



**Fábio Filipe Dionísio Amendoeira**

## **ADERÊNCIA DE VARÕES NERVURADOS SUJEITOS A ESFORÇOS DE COMPRESSÃO**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Estruturas

Orientadora: Doutora Ana Sofia Louro, Bolseira de  
Pós-Doutoramento, LNEC

Co-orientador: Prof. Doutor Válder Lúcio, Professor  
Associado, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Armando Manuel Sequeira Nunes Antão

Arguente(s): Prof. Doutor Rui Pedro César Marreiros

Vogal(ais): Prof. Doutor Válder José da Guia Lúcio



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Junho de 2015**

**LOMBADA**



**ADERÊNCIA DE VARÕES NERVURADOS SUJEITOS A ESFORÇOS DE COMPRESSÃO**  
**Fábio Amendoeira**

**2015**

**Fábio Filipe Dionísio Amendoeira**

**ADERÊNCIA DE VARÕES NERVURADOS SUJEITOS A  
ESFORÇOS DE COMPRESSÃO**

Dissertação apresentada para obtenção do Grau de  
Mestre em Engenharia Civil, perfil de Estruturas, pela  
Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e  
Tecnologia.

CAPARICA 2015

# **ADERÊNCIA DE VARÕES NERVURADOS SUJEITOS A ESFORÇOS DE COMPRESSÃO**

**“Copyright”**

**Fábio Filipe Dionísio Amendoeira, FCT/UNL**

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais e irmãos, que durante todo o percurso académico me deram o seu apoio incondicional. A força e a acreditação por eles depositada em mim, permitiu-me chegar até aqui.

À Mónica Caixa, pela força transmitida e pilar emocional ao longo destes anos.

À Doutora Ana Sofia Louro, pela excelência da sua orientação, pelos conhecimentos transmitidos, o acompanhamento e incentivo prestados. Sem a Doutora este trabalho não seria igual.

Ao Professor Doutor Válder Lúcio, pela excelência da sua coorientação e por toda a disponibilidade prestada. Sem o Professor, este trabalho não teria sido possível.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, por permitir que os ensaios decorressem nas suas instalações.

A toda a equipa da sala de ensaios laboratoriais do Núcleo de Comportamento de Estruturas do LNEC, nomeadamente ao Paulo Marques, ao Paulo Santos e ao Joaquim Pereira, por todo o apoio e ajuda prestado durante a realização dos ensaios.

A todos os amigos da FCT/UNL, pelo companheirismo e amizade que tão importantes foram ao longo destes anos, em especial ao Nuno Leal, Mário Antunes, José Brito, António Chinita, Marco Raposeira, Pedro Rodrigues, João Grazina e Diogo Moreira. Também ao Manuel Gonçalves pela amizade nestes últimos anos e também pela ajuda nesta minha nova fase profissional.



# **ADERÊNCIA DE VARÕES NERVURADOS SUJEITOS A ESFORÇOS DE COMPRESSÃO**

## **RESUMO**

O presente trabalho surge na continuação do trabalho realizado pela autora Ana Sofia Louro na sua dissertação de Doutoramento. Após análise efetuada ao seu trabalho e pesquisa bibliográfica, é notória a necessidade de melhor se compreender os efeitos resultantes de esforços de compressão na aderência, para que se possa comparar com o verificado nas situações de tração, levando a uma melhor compreensão das diferentes variáveis e do seu papel nas diferentes situações.

Para tal estudo, utilizaram-se os provetes remanescentes do trabalho da autora, e foi traçado um plano de ensaios que permitisse compreender os fenómenos da ligação. Os provetes visam simular uma ligação viga-pilar, na medida em que é um dos locais onde ocorrem maiores solicitações na ligação entre os dois materiais. Os provetes foram executados com betões C30/37 e C50/60, e os varões com aço do tipo A500NR SD com 16 e 25 mm de diâmetro, de modo a obter resultados representativos das construções em Portugal.

Durante os ensaios ocorreram problemas de encurvadura nos provetes com betões de maior resistência. Ainda assim, quando analisados os resultados de compressão e comparados com os ensaios de tração, foi possível verificar e concluir que a resistência do betão continua a assumir o papel de maior importância na ligação uma vez que a variação da resistência do betão conduziu a diferenças mais relevantes nas restantes variáveis.

## **PALAVRAS-CHAVE:**

- Betão;
- Varões nervurados;
- Aderência;
- *Push-in*;
- Ensaio monotónico de compressão.

# **BOND OF RIBBED BARS UNDER COMPRESSION**

## **ABSTRACT**

The present work it's a continuation of the study done by Ana Sofia Louro in her dissertation of PhD. After analysis of the authoress work and bibliographic research, it's easy to acknowledge the need of a better understanding of compression stresses on bond performance, so that can be compared to the traction situation, leading to a better knowledge of all variables that have an important role in the bond interaction.

For that study, the samples used were the ones that left over by the authoress work, and it was established a work plan that would allow a better understanding of the bond phenomenon. The samples used as the main objective to simulate a pillar-beam union, where the bond connection has a bigger solicitation. The material used to made the sample are concrete C30/37 and C50/60, and A500NR SD bars with 16 and 25 mm of diameter, with the objective to be representative of the construction materials used today in Portugal.

The laboratorial tests have revealed some problems with buckling, especially on more resistant concrete. Even so, when the data of compression results were analyzed and compared with the traction results, it was possible to conclude that the concrete resistance has the bigger role in the bond performance, having all the variables revealed a more pronounced data in the presence of the more resistant concrete.

## **KEYWORDS:**

- Concrete;
- Ribbed bars;
- Bond;
- Push-in;
- Monotonic tests in compression.

# ADERÊNCIA DE VARÕES NERVURADOS SUJEITOS A ESFORÇOS DE COMPRESSÃO

## ÍNDICE DE TEXTO

<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 - MOTIVAÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 - OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
<b>CAPÍTULO 2 - A ADERÊNCIA NA REGULAMENTAÇÃO EXISTENTE .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 - INTRODUÇÃO À LIGAÇÃO AÇO-BETÃO .....</b>	<b>7</b>
2.1.1 - Componentes da aderência entre o aço e o betão .....	8
Aderência química ou por adesão .....	9
Aderência por atrito .....	9
Aderência mecânica .....	9
2.1.2 - Rotura da aderência .....	10
Rotura por <i>splitting</i> .....	10
Rotura pelo cone de betão .....	11
Rotura por plastificação da armadura .....	12
Rotura por <i>pull-out</i> .....	12
<b>2.2 - O EUROCÓDIGO 2 E A ADERÊNCIA AÇO-BETÃO .....</b>	<b>13</b>
2.2.1 - Durabilidade e recobrimento de armaduras .....	14
Influência da oxidação e corrosão dos varões de aço .....	15
2.2.2 - Amarração de armaduras longitudinais .....	16
2.2.2.1 - Tensão de rotura da aderência .....	17
Influência do betão .....	18
Influência do diâmetro do varão .....	20
2.2.2.2 - Comprimento de amarração de referência .....	21
Influência do tipo de aço e da geometria das nervuras .....	22
2.2.2.3 - Comprimento de amarração de cálculo .....	27
Influência do confinamento e das pressões ortogonais ao plano de confinamento .....	29
Influência da história de carga dos elementos .....	32
Influência da temperatura .....	32

2.3 – MODEL CODE 2010 E A ADERÊNCIA AÇO-BETÃO.....	35
2.3.1- Regime Monotónico.....	36
<b>CAPÍTULO 3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>41</b>
3.1 - INTRODUÇÃO .....	43
3.2 - VARIÁVEIS DE ESTUDO.....	43
3.3 - OBJETIVOS .....	45
3.4 - PROPRIEDADES DOS PROVETES .....	45
3.4.1- Características dos provetes e materiais usados .....	45
3.4.2- Alterações efetuadas aos provetes.....	52
3.5 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ENSAIO .....	60
3.6 - CAMPANHA DE ENSAIOS REALIZADOS.....	63
3.6.1- Ensaio de compressão a betões .....	63
3.6.2- Ensaio de caracterização da aderência .....	65
<b>CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>67</b>
4.1 - INTRODUÇÃO .....	69
4.2 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS MONOTÓNICOS À COMPRESSÃO .....	70
4.2.1- Influência das diferentes variáveis envolvidas.....	85
4.3 - ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS MONOTÓNICOS EM COMPRESSÃO E EM TRAÇÃO .....	97
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>107</b>
5.1 - SÍNTESE DO TRABALHO EFETUADO.....	109
5.1.1- Principais conclusões .....	110
Influência da área relativa das nervuras transversais.....	110
Influência da resistência do betão.....	110
Influência do diâmetro do varão .....	111
Influência da história de carga.....	111
5.2 - PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS .....	112
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>115</b>
<b>ANEXOS - RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS .....</b>	<b>123</b>



# ADERÊNCIA DE VARÕES NERVURADOS SUJEITOS A ESFORÇOS DE COMPRESSÃO

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2 - A ADERÊNCIA NA REGULAMENTAÇÃO EXISTENTE

Figura 2.1 - Fendimento do betão devido a forças de ligação, adaptado de (3).....	7
Figura 2.2 - Curva típica da relação tensão de aderência <i>versus</i> deslizamento local, adaptado de (4).....	8
Figura 2.3 - Curvas de tensão de aderência <i>versus</i> escorregamento, adaptado de (7).....	9
Figura 2.4 - Aderência mecânica num varão nervurado, adaptado de (9).....	10
Figura 2.5 - Rotura pelo fenómeno de <i>splitting</i> (10).....	11
Figura 2.6 - Rotura por arrancamento de cone de betão (10).....	12
Figura 2.7 - Falha por plastificação da armadura (10). ....	12
Figura 2.8 - Rotura por <i>pull-out</i> (10).....	13
Figura 2.9 - Rotura em ensaios de <i>pull-out</i> agravados por corrosão (13). ....	15
Figura 2.10 - Efeito de perda de seção do varão devido a corrosão, adaptado de (12). ....	16
Figura 2.11 - Tipos de amarração para além da de prolongamento reto (2).....	17
Figura 2.12 - Representação das condições de aderência segundo Eurocódigo 2 (2). ....	18
Figura 2.13 - Formação de espaços vazios e/ou poros na zona inferior dos varões horizontais betonados na vertical, devido à acumulação de água (23). ....	20
Figura 2.14 - Diagrama de tensão-extensão dos cinco tipos de aço mais utilizados em Portugal (1). ....	23
Figura 2.15 - Parâmetros de consideração de perfis nervurados (1). ....	25
Figura 2.16 - Valores de $c_d$ tendo em conta o efeito de recobrimento mínimo do betão segundo Eurocódigo 2 (2). ....	28
Figura 2.17 - Exemplos da interação confinamento-ligação: a) amarração de varões (confinamento em parte ativo e em parte passivo); b) emenda sobreposta de varões (confinamento passivo por parte dos estribos); c) confinamento típico de uma ligação viga-pilar (confinamento	

ativo); d) exemplo de fendimento e acções confinantes em torno do varão de aço, adaptado de (27). .....	30
Figura 2.18 - Degradação da ligação aço-betão a altas temperaturas com utilização de varões nervurados, adaptado de (40). .....	34
Figura 2.19 - Degradação da ligação aço-betão a altas temperaturas com utilização de varões lisos, adaptado de (40). .....	34
Figura 2.20 - Curvas de tensão de aderência <i>versus</i> escorregamento, adaptado de Model Code (27). .....	36
Figura 2.21 - Modelos de tensão de aderência <i>versus</i> escorregamento (1). .....	37
Figura 2.22 - Exemplo de rotura por <i>splitting</i> (42). .....	38
Figura 2.23 - Ilustração das relações entre rotura por <i>splitting</i> , por <i>pull-out</i> e por <i>pull-out</i> induzido por <i>splitting</i> (1). .....	39

### CAPÍTULO 3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

Figura 3.1 - Sistema de coordenadas utilizado para descrever os provetes, retirado de (1). .....	47
Figura 3.2 - Características dos provetes 16 mm, corte X-X', retirado de (1). .....	47
Figura 3.3 - Características dos provetes de 16 mm, corte Y-Y', retirado de (1). .....	47
Figura 3.4 - Características dos provetes de 16 mm, corte Z-Z', retirado de (1). .....	48
Figura 3.5 - Características dos provetes 25 mm, corte X-X', retirado de (1). .....	48
Figura 3.6 - Características dos provetes 25 mm, corte Y-Y', retirado de (1). .....	48
Figura 3.7 - Características dos provetes 25 mm, corte Z-Z', retirado de (1). .....	49
Figura 3.8 – Modelos de encurvadura para elementos contraventados, retirado de (44). .....	53
Figura 3.9 - Esquema representativo do sistema de ensaio antes de corte do varão. ....	54
Figura 3.10 - Foto de ensaio antes das alterações aos provetes, alusiva ao facto de a garra da máquina não poder agarrar o varão mais abaixo, uma vez que o mesmo encosta no cabeçote superior da máquina. ....	54
Figura 3.11 - Resultado do ensaio do provete AT_C2_16_3 da autora (1). .....	56
Figura 3.12 - Esquema da área de betão mobilizada nas situações de compressão e de tracção. ....	57
Figura 3.13 - Sistema de ensaio com placa de suporte do provete. ....	60
Figura 3.14 - Esquema da placa de suporte dos provetes. ....	61
Figura 3.15 - Posição dos CDP's; à esquerda no início do ensaio e à direita no final do ensaio. ....	62
Figura 3.16 - Provede cúbico sujeito a ensaio de resistência à compressão. ....	64
Figura 3.17 - Envolvente monotónica para diferentes velocidades de deslizamento impostas, adaptado de (5). .....	66

## **CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

Figura 4.1 - Resultados obtidos nos provetes A_C2_16. ....	71
Figura 4.2 - Resultados obtidos nos provetes A_C1_16. ....	73
Figura 4.3 - Resultados obtidos nos provetes B_C1_16. ....	75
Figura 4.4 - Resultados obtidos nos provetes BT_C1_16. ....	76
Figura 4.5 - Resultados obtidos no segundo lote dos provetes BT_C1_16. ....	78
Figura 4.6 - Resultados obtidos nos provetes AT_C1_25. ....	79
Figura 4.7 - Resultados obtidos nos provetes AT_C2_25. ....	81
Figura 4.8 - Resultados obtidos nos provetes BT_C1_25. ....	82
Figura 4.9 - Resultados obtidos nos provetes B_C2_16. ....	84
Figura 4.10 - Análise comparativa dos resultados obtidos nos provetes A_C1_16 e B_C1_16. ....	86
Figura 4.11 - Análise comparativa dos resultados obtidos nos provetes A_C2_16 e B_C2_16. ....	87
Figura 4.12 - Análise comparativa dos resultados obtidos nos provetes A_C2_16 e A_C1_16. ....	89
Figura 4.13 - Análise comparativa dos resultados obtidos nos provetes B_C1_16 e B_C2_16. ....	91
Figura 4.14 - Análise comparativa dos resultados obtidos nos provetes A_C2_16 e AT_C2_25. ....	93
Figura 4.15 - Análise comparativa dos resultados obtidos nos provetes AT_C1_25 e BT_C1_16. ....	95
Figura 4.16 - Análise comparativa dos resultados obtidos nos provetes AT_C1_25 e BT_C1_25. ....	96

## **CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS**

Figura 5.1 - Esquema sugestivo de melhorias a adotar para ensaio de arrancamento em compressão. ....	113
--	-----

# ADERÊNCIA DE VARÕES NERVURADOS SUJEITOS A ESFORÇOS DE COMPRESSÃO

## ÍNDICE DE QUADROS

### **CAPÍTULO 2 - A ADERÊNCIA NA REGULAMENTAÇÃO EXISTENTE**

Quadro 2.1 - Relação da altura das nervuras com o modo de rotura e a resistência da ligação, quando utilizado um confinamento elevado, adaptado de (31). .....	26
Quadro 2.2 - Valores dos coeficientes $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ e $\alpha_5$ (Quadro 8.2 do Eurocódigo 2). .....	28
Quadro 2.3 - Relação do nível de confinamento com o modo de rotura e a resistência da ligação, aquando da utilização da mesma altura das nervuras, adaptado de (31). .....	31
Quadro 2.4 - Valores de tensão de aderência, adaptado do Model Code 2010 (27). .....	37

### **CAPÍTULO 3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Quadro 3.1 - Características mecânicas dos varões em estudo, adaptado de (1). .....	49
Quadro 3.2 - Resistência média dos betões e área relativa das nervuras dos varões.....	50
Quadro 3.3 - Resistência do betão à compressão e à tracção aos 28 dias. ....	50
Quadro 3.4 - Provetes escolhidos para realização dos ensaios e respectivas propriedades.....	51
Quadro 3.5 - Cálculo da tensão crítica aproximada aos diversos modelos de encurvadura. ....	59
Quadro 3.6 - Valores utilizados no cálculo do Quadro 3.5. ....	59
Quadro 3.7 - Calibração dos transdutores de deslocamento para ensaios monotónicos. ....	62
Quadro 3.8 - Valores de resistência à compressão dos cubos na data de ensaio.....	64
Quadro 3.9 - Provetes a comparar e principais parâmetros a analisar.....	65

### **CAPÍTULO 4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

Quadro 4.1 - Tensões de aderência obtidas nos provetes A_C2_16. ....	72
Quadro 4.2 - Tensões de aderência obtidas nos provetes A_C1_16. ....	73
Quadro 4.3 - Tensões de aderência obtidas nos provetes B_C1_16.....	75

Quadro 4.4 - Tensões de aderência obtidas nos provetes BT_C1_16. ....	77
Quadro 4.5 - Tensões de aderência obtidas no segundo lote dos provetes BT_C1_16. ....	78
Quadro 4.6 - Tensões de aderência obtidas nos provetes AT_C1_25. ....	80
Quadro 4.7 - Tensões de aderência obtidas nos provetes AT_C2_25. ....	81
Quadro 4.8 - Tensão de aderência nos vários ciclos do ensaio monotónico com descarga. ....	83
Quadro 4.9 - Tensões de aderência obtidas nos provetes B_C2_16. ....	84
Quadro 4.10 - Valores médios dos resultados obtidos nos provetes A_C1_16 e B_C1_16. ....	86
Quadro 4.11 - Valores médios dos resultados obtidos nos provetes A_C2_16 e B_C2_16. ....	88
Quadro 4.12 - Valores médios dos resultados obtidos nos provetes A_C2_16 e A_C1_16. ....	89
Quadro 4.13 - Valores médios dos resultados obtidos nos provetes B_C1_16 e B_C2_16. ....	91
Quadro 4.14 - Valores médios dos resultados obtidos nos provetes A_C2_16 e AT_C2_25. ....	93
Quadro 4.15 - Valores médios dos resultados obtidos nos provetes AT_C1_25 e BT_C1_16. ....	95
Quadro 4.16 - Valores médios dos resultados obtidos nos provetes AT_C1_25 e BT_C1_25. ....	97
Quadro 4.17 - Comparação dos resultados obtidos nos provetes A_C1_16 para ensaios monotónicos com arranque em compressão e em tração. ....	99
Quadro 4.18 - Comparação dos resultados obtidos nos provetes A_C2_16 para ensaios monotónicos com arranque em compressão e em tração. ....	100
Quadro 4.19 - Comparação dos resultados obtidos nos provetes AT_C1_25 para ensaios monotónicos com arranque em compressão e em tração. ....	101
Quadro 4.20 - Comparação dos resultados obtidos nos provetes AT_C2_25 para ensaios monotónicos com arranque em compressão e em tração. ....	102
Quadro 4.21 - Comparação dos resultados obtidos nos provetes B_C1_16 para ensaios monotónicos com arranque em compressão e em tração. ....	103
Quadro 4.22 - Comparação dos resultados obtidos nos provetes B_C2_16 para ensaios monotónicos com arranque em compressão e em tração. ....	104
Quadro 4.23 - Comparação dos resultados obtidos nos provetes BT_C1_25 para ensaios monotónicos com arranque em compressão com descarga e em tração sem descarga. ....	105

## SIMBOLOGIA:

### ALFABETO LATIM

$A_{gt}$	Extensão total na força máxima
$A_s$	Área do varão longitudinal
$A_{sv}$	Área de influência das barras verticais
$A_r$	Área da projeção da nervura da secção transversal do varão
$E$	Módulo de elasticidade do material
$F_a$	Força de tração necessária para arrancamento do varão
$I$	Inércia de uma secção
$P_{cr}$	Carga crítica para a qual ocorrerá encurvadura
$R_{eH}$	Tensão de cedência da armadura
$R_m$	Tensão de rotura à tração da armadura
$a_m$	Média das alturas das nervuras transversais dos dois lados dos varões
$c$	Distância entre o centro de duas nervuras
$c_{min}$	Altura mínima de recobrimento
$c_{min,b}$	Altura de recobrimento mínima para os requisitos de aderência
$c_{min,dur}$	Recobrimento mínimo relativo às condições ambientais
$c_{nom}$	Altura nominal de recobrimento
$d$	Diâmetro do varão
$d_0$	Diâmetro de referência do varão
$d_b$	Diâmetro nominal do varão
$f_{bd}$	Tensão de rotura de aderência de cálculo

$f_c$	Tensão de rotura do betão à compressão
$f_{c0}$	Tensão de referência de rotura do betão à compressão
$f_{cc}$	Tensão de rotura do betão à compressão em provetes cúbicos
$f_{cm}$	Tensão de compressão média dos provetes
$f_{ct}$	Valor da resistência do betão à tração
$f_{ctd}$	Valor de cálculo da resistência do betão à tração
$f_{ctm}$	Valor de médio da tensão de rotura do betão à tração
$f_R$	Área relativa das nervuras transversais
$l_0$	Comprimento efetivo ou de encurvadura
$l_b, l_d$	Comprimento aderente do varão
$l_{bd}$	Comprimento aderente de cálculo
$l_{b,eq}$	Comprimentos de amarração equivalente
$l_{b,min}$	Comprimento de amarração mínimo
$l_{b,rqd}$	Comprimento aderente necessário
$n$	Número de ciclos
$s$	Deslizamento
$s_n$	Deslizamento para um dado ciclo
$w/c$	Razão água/cimento

## ALFABETO GREGO

$\Delta c_{dur,add}$	Redução do recobrimento mínimo no caso de proteção adicional
$\Delta c_{dur,st}$	Redução de recobrimento mínimo no caso de utilização de aço inoxidável
$\Delta c_{dur,\gamma}$	Margem de segurança para execução de recobrimento de segurança

$\Sigma f_i$	Valor de referência do perímetro da secção sem nervuras transversais
$\alpha$	Ângulo do betão esmagado com a face do varão; Parâmetro Model Code 2010 para o ramo ascendente da relação tensão de aderência-deslizamento
$\alpha_1$	Parâmetro que tem em conta o efeito da forma dos varões admitindo um recobrimento adequado
$\alpha_2$	Parâmetro que tem em conta o efeito de recobrimento mínimo de betão
$\alpha_3$	Parâmetro que tem em conta o efeito de cintagem das armaduras transversais
$\alpha_4$	Parâmetro que tem em conta a influência de um ou mais varões transversais soldados
$\alpha_5$	Parâmetro que tem em conta o efeito da pressão ortogonal ao plano de fendimento ao longo do comprimento de amarração de cálculo
$\beta$	Parâmetros da relação local de aderência <i>versus</i> deslizamento
$\phi$	Diâmetro do varão
$\phi_t$	Diâmetro do varão transversal
$\phi(\xi)$	Representa a eficiência do confinamento
$\gamma$	Parâmetros da relação local de aderência <i>versus</i> deslizamento
$\eta_1$	Coefficiente relacionado com as condições de aderência e com a posição do varão durante a betonagem
$\eta_2$	Coefficiente relacionado com o diâmetro do varão
$\sigma_{cr}$	Tensão de encurvadura crítica
$\sigma_s$	Tensão aplicada ao varão de aço
$\sigma_{sd}$	Tensão de cálculo na secção do varão
$\sigma_{sv}$	Tensão no reforço vertical
$\tau_{0,01}$	Tensão de aderência com 0,01 mm de deslizamento
$\tau_{0,1}$	Tensão de aderência com 0,1 mm de deslizamento



$\tau_1^{RB}$	Tensão de aderência máxima de varões nervurados
$\tau_1^{SB}$	Tensão de aderência máxima de varões lisos
$\tau_{1,0}$	Tensão de aderência com 1,0 mm de deslizamento
$\tau_b, \tau_{bu}$	Tensão de aderência aço-betão
$\tau_{b,max}^*$	Tensão de aderência máxima com confinamento
$\tau_{d,atrito}$	Tensão de aderência por atrito
$\tau_{m\acute{a}x}, \tau_{d,m\acute{a}x}$	Tensão de aderência máxima
$\tau_{m\acute{e}d}, \tau_{d,m\acute{e}d}$	Tensão de aderência média
$\tau_{res}^{CC}$	Tensão de aderência de atrito com confinamento
$\tau_{res}^{SB}$	Tensão de aderência de atrito em varões lisos
$\tau_{res}^{SC}$	Tensão de aderência de atrito sem confinamento
$\psi$	Parâmetros da relação local de aderência <i>versus</i> deslizamento



# **CAPÍTULO 1**



## **1.1 - Introdução**

Até ao início dos anos 70 o cálculo em projeto não considerava o efeito das ações cíclicas numa estrutura, nomeadamente a análise sísmica. Era, então, considerada uma ligação perfeita entre o aço-betão de uma estrutura, o que nem sempre acontece. Existem inúmeros fatores que influenciam essa ligação, levando a que a mesma falhe e originando o escorregamento do aço no interior do betão, com consequente alteração do comportamento estrutural dos elementos de betão armado.

Assim, pretendem-se soluções economicamente viáveis e que, perante um sismo de grandes magnitudes, não colapsem, colocando em causa a vida humana. Portanto, surge a necessidade de minimizar os danos sofridos pelas estruturas sobre a ação de cargas cíclicas, maximizando a dissipação de energia.

Tendo conhecimento da possibilidade de rotura na ligação aço-betão, o que leva a que ocorram diferentes deformações entre os dois materiais, considera-se importante o estudo de provetes de betão armado sujeitando-os a ensaios monotónicos e ensaios cíclicos (sendo que este estudo se refere a ensaios monotónicos com arranque em compressão), uma vez que este fenómeno pode levar à ocorrência de rótulas plásticas nas zonas de ligação, como sejam as ligações vigas-pilar e as ligações pilar-fundação.

## **1.2 - Motivação**

Na continuação dos trabalhos de investigação realizados por Ana Sofia Louro (1), a existência de provetes remanescentes desse mesmo trabalho surge como incentivo adicional para a pesquisa e estudo das publicações existentes na matéria, para que se possa aproveitar estes mesmos provetes para explorar e compreender os fenómenos existentes no processo de aderência entre o betão e os varões de aço.

Após extensa e minuciosa pesquisa bibliográfica sobre este tema, foi possível concluir que a interação entre estes dois materiais já se encontra exaustivamente estudada, tendo sido analisadas as principais variáveis que assumem importância no desempenho da ligação entre os dois materiais (variáveis como a área relativa das nervuras transversais ou o tipo de betão

utilizado). Contudo, as conclusões retiradas do papel destas variáveis no bom desempenho da ligação ocorreram sempre em ensaios monotónicos do tipo *pull-out* ou em ensaios cíclicos com início dos ensaios em tração. A observação deste facto permite concluir que existe uma grande carência de estudos para análise das mesmas variáveis mas em situações de *push-in* (ensaios monotónicos em compressão e ensaios cíclicos com início em compressão), uma vez que no caso de um sismo real ou qualquer outro tipo de solicitação inesperado, não é possível controlar em que tipo de regime a solicitação irá mobilizar um determinado elemento estrutural.

### 1.3 - Objetivos

Diversos autores desenvolveram inúmeros estudos ao longo dos últimos 30 anos, de forma a perceber os mecanismos de ligação aço-betão. Contudo, perante o anteriormente referido e do que foi possível concluir através de pesquisa bibliográfica, começa-se a ponderar o papel que as principais variáveis do comportamento à tração da ligação aço-betão desempenham agora no caso de regime de compressão.

Espera-se, assim, que este trabalho permita perceber se os modelos de tração utilizados por Ana Sofia Louro (1) são aplicáveis quando são impostas forças de compressão. Ainda que inicialmente seja esperado um aumento de tensão de aderência máximo no caso de compressão, quando comparado com o obtido em tração, a análise comparativa entre os dois regimes permitirá verificar a existência desse aumento, compreendê-lo e quantificá-lo.

Toda esta análise também possibilitará verificar se as normas utilizadas atualmente vão de encontro aos resultados deste estudo. Este ponto irá assumir particular importância porque permite concluir se existem considerações importantes que sejam menosprezadas, uma vez que o Eurocódigo 2 (2) foca uma maior atenção e preocupação aos fenómenos de aderência entre o aço e o betão quando sujeitos a tração.

## **CAPÍTULO 2**

### **A aderência na regulamentação existente**





## 2.1 - Introdução à ligação aço-betão

A ligação aço-betão é o fenómeno que permite que as forças longitudinais aplicadas sejam distribuídas do aço para o betão envolvente. Devido a estas transferências de esforços, as forças ao longo do comprimento do varão variam e, consequentemente, as forças transferidas para o betão também serão diferentes. Tais variações de esforços entre os dois materiais originam o aparecimento de deslocamentos relativos entre os mesmos, conduzindo ao fenómeno de deslizamento/escorregamento entre o aço e o betão.

A boa prestação do mecanismo de aderência assume grande importância nas estruturas de betão armado, uma vez que nas zonas de esforços concentrados (como a ligação viga-pilar ou pilar-fundação) surge não só necessidade de se manter a adesão entre o betão e o varão de aço, como a de dissipar energia através de deslizamento entre os dois materiais, sem que haja formação de rótulas plásticas. A má prestação do mecanismo de aderência poderá causar não só a abertura de fendas em condições de serviço, como originar o colapso da estrutura quando sujeita a ações cíclicas severas, tais como os sismos (5).

Assim, durante o processo de compressão ou tração do elemento de betão armado, enquanto não ocorrer fendilhação do betão, os dois elementos irão possuir as mesmas deformações. A partir de determinados valores de tensão de aderência, o betão não conseguirá acompanhar as deformações do varão de aço, pelo que irá deformar localmente através de fendilhação, visível na Figura 2.1, tratando-se de um fenómeno de aderência local mais complexo que possibilitará deslocamentos relativos entre os dois materiais.

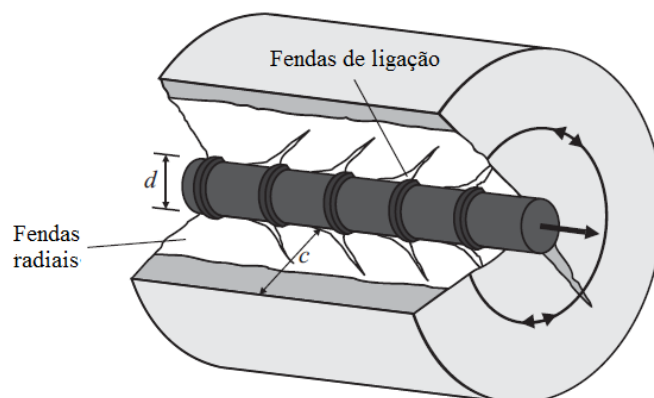


Figura 2.1 - Fendimento do betão devido a forças de ligação, adaptado de (3).

É, assim, possível afirmar que o estudo da aderência entre os dois materiais encontra-se diretamente relacionado com o fendimento do betão. De modo a quantificar a eficiência da ligação aço-betão, relacionam-se os deslocamentos relativos entre os dois materiais para que seja possível associar valores máximos de deslizamento a certos estados de fissuração e deformação entre os mesmos.

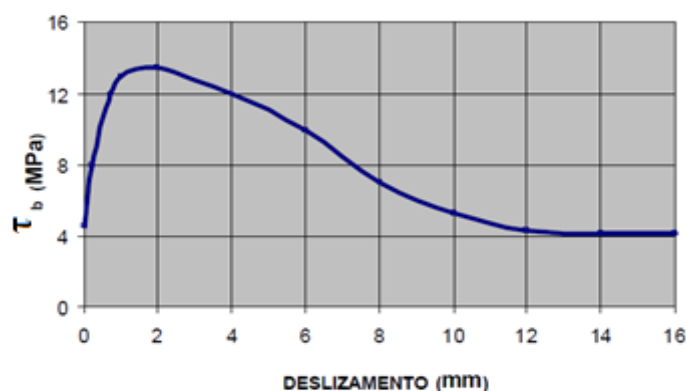


Figura 2.2 - Curva típica da relação tensão de aderência *versus* deslizamento local, adaptado de (4).

A Figura 2.2 é representativa da relação tensão de aderência *versus* deslizamento local apresentada por Eligehausen (5), de um betão convencional e um varão de aço nervurado, sujeito a um ensaio do tipo *pull-out*. É, assim, possível verificar que o deslizamento inicial se deve à deformação conjunta do betão e do varão de aço, sendo que para valores mais elevados o deslizamento é causado pelo fendimento e esmagamento do betão entre as nervuras do varão de aço.

### 2.1.1 - Componentes da aderência entre o aço e o betão

A tensão de aderência deve-se, essencialmente, a três parcelas, sendo elas a aderência química, a aderência por atrito e a aderência mecânica. Segundo Fernandes (6), apesar de ser possível definir as três separadamente, não é possível determinar a contribuição de cada uma individualmente, devido à complexidade dos fenómenos envolvidos. Ainda assim, em muitos dos trabalhos que focam o tema e através da análise do comportamento dos gráficos de tensão de aderência *versus* deslizamento, é possível atribuir intervalos de tensão de aderência a cada uma das parcelas específicas que compõem a tensão de aderência, como é possível verificar através da análise detalhada das diferentes fases que se apresentam na Figura 2.3.

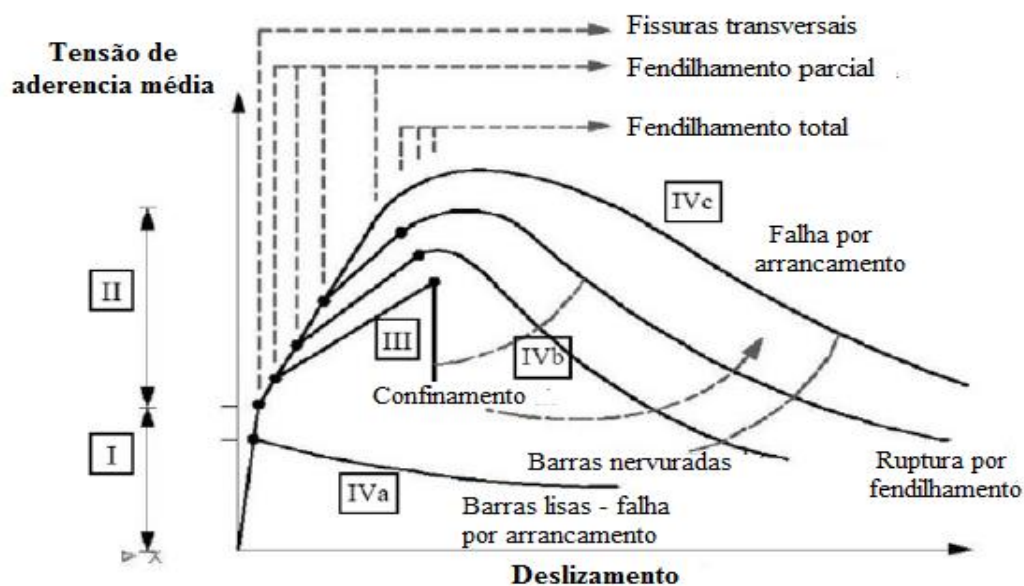


Figura 2.3 - Curvas de tensão de aderência *versus* escorregamento, adaptado de (7).

### **ADERÊNCIA QUÍMICA OU POR ADESÃO**

Esta parcela da aderência assume particular importância nas armaduras lisas. A sua contribuição é reduzida, uma vez que apenas induz resistência à ligação através de fenômenos químicos que surgem durante a secagem do betão, quando em contacto com o varão de aço por ele envolvido.

### **ADERÊNCIA POR ATRITO**

A aderência por atrito tem um papel mais importante que a parcela anterior, uma vez que influencia a resistência da ligação aço-betão a partir do momento em que a ligação química falha. Segundo Leonhard (8), para existir aderência por atrito têm de ocorrer deslocamentos relativos entre os dois materiais, justificando, assim, a sequência dos fenômenos. A influência desta parcela irá depender da rugosidade e das irregularidades existentes entre os dois materiais, quando solicitadas por pressões transversais (tais como forças externas ou retração do betão) criando assim forças de atrito entre eles. A relação da rugosidade entre os dois materiais designa-se por coeficiente de atrito.

### **ADERÊNCIA MECÂNICA**

Para o caso de utilização de varões nervurados, esta parcela de aderência é a que mais contribui para a boa prestação da ligação aço-betão. A aderência mecânica surge derivada da interação

das nervuras do varão com o betão circundante, que quando solicitado tende a resistir fendilhando até ao ponto em que se dê o seu esmagamento entre as nervuras do varão, altura em que termina a contribuição deste tipo de aderência. Assim, a boa prestação desta ligação depende, essencialmente, da área relativa das nervuras transversais do varão ( $f_R$ ), que se define em função de parâmetros como a altura, a inclinação e o espaçamento das nervuras.

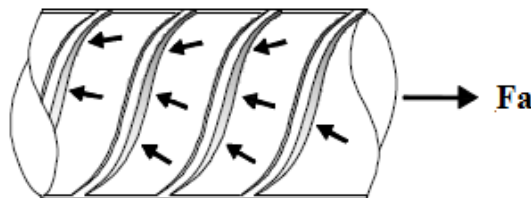


Figura 2.4 - Aderência mecânica num varão nervurado, adaptado de (9).

Embora seja um tipo de aderência mais importante aquando da utilização de varões nervurados, esta parcela também se encontra presente nas armaduras lisas, ainda que a sua participação seja muitíssimo reduzida, ocorrendo apenas nas irregularidades microscópicas dos varões e chegando a ser indetetável ou por vezes confundida com a parcela de aderência química, como foi referenciado pelo autor (7).

### 2.1.2 - Rotura da aderência

No que respeita à rotura de aderência, torna-se fundamental referir que a degradação da ligação pode desencadear-se por diversos mecanismos. A maioria dos autores que realizam ensaios laboratoriais sobre este tema assume a existência de dois tipos principais de falhas, nomeadamente por *splitting* e por *pull-out*, visto que estes mecanismos são os que assumem maior importância. Porém, a rotura da aderência também pode ocorrer por rotura de cone de betão e por plastificação da armadura, o que acontecendo em estruturas correntes de betão armado, condiciona o seu desempenho e, consequentemente, as condições de segurança.

#### ROTURA POR SPLITTING

Como referido anteriormente, a rotura por *splitting* constitui uma das principais falhas conferidas ao estudo da ligação aço-betão, dando-se principalmente pela falta de confinamento do elemento. O fenómeno de *splitting* ocorre devido ao desenvolvimento de fendas

longitudinalmente, como é alusiva a Figura 2.5, ao longo do eixo da barra, que se propagam por aparecimento de esforços de tração na parte da “frente” das mesmas. Os referidos esforços são originados principalmente pela compressão da parcela de aderência mecânica induzida pelas nervuras do varão.

As causas de falha por este tipo de rotura são principalmente condicionadas pelo confinamento ativo e/ou passivo conferido ao elemento e pela resistência à tração do betão em si. Contudo, existem outros fatores condicionantes ao aparecimento e propagação da fendilhação no betão, alguns de mais difícil controlo em ambiente não laboratorial, mas que ainda assim não se devem desprezar. São exemplo de alguns desses fenómenos a heterogeneidade do material, o espaçamento entre as nervuras do varão e as disparidades geométricas do elemento.

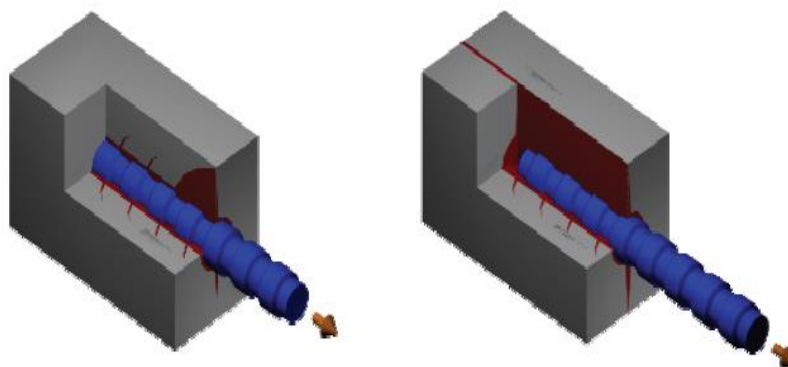


Figura 2.5 – Rotura pelo fenómeno de *splitting* (10).

### **ROTURA PELO CONE DE BETÃO**

Este tipo de rotura, mais comum em zonas de ancoragem de pré-esforço, caracteriza-se pela extração de um cone de betão juntamente com o varão de aço, como se exemplifica na Figura 2.6. Trata-se de uma rotura muito característica que se deve principalmente à propagação radial da fendilhação no betão, em redor do varão de aço, que devido aos esforços de tração tende a formar uma superfície de descolamento em forma de cone. Quando as forças normais exercidas pelo varão não são suficientes para vencer as tensões de aderência da ligação, atingido o limite da resistência à tração do betão, dá-se a rotura do cone de betão. Convém realçar que esta não constitui uma falha muito comum porque, ainda que a ligação aço-betão apresente boas prestações, a sua tensão de aderência costuma ser inferior à resistência à tração do betão.

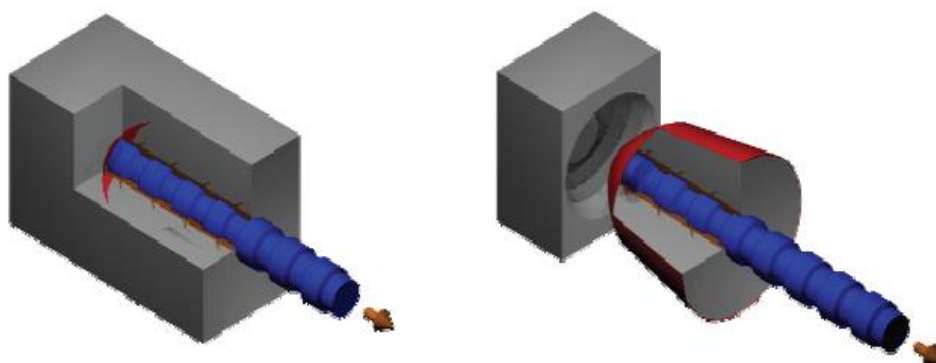


Figura 2.6 - Rotura por arrancamento de cone de betão (10).

### **ROTURA POR PLASTIFICAÇÃO DA ARMADURA**

A rotura por plastificação da armadura é característica de zonas de ancoragens de pré-esforço. Este fenómeno ocorre aquando da utilização de um betão com muito boas características e com uma ligação aço-betão com muito boas propriedades, sob condições de confinamento muito elevado. A concentração de esforços muito elevada no varão de aço, não embebido no betão, leva a que seja atingido o limite da resistência à tração do mesmo, ocorrendo a rotura por plastificação da armadura. Conclui-se, assim, que a mesma em nada depende da resistência da ligação aço-betão, em face das boas condições de ligação entre os dois materiais.

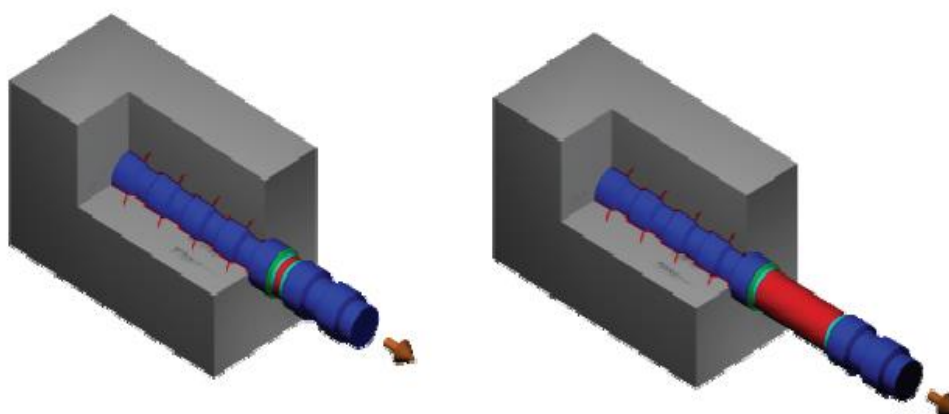


Figura 2.7 - Falha por plastificação da armadura (10).

### **ROTURA POR *PULL-OUT***

Este tipo de rotura assume particular interesse no estudo das condições da ligação entre os dois materiais, uma vez que permite melhor caracterizar a degradação da aderência. Para que este

tipo de rotura aconteça, é importante que haja bom confinamento do elemento de modo a evitar a propagação da fendilhação do betão. A ligação falhará após o esmagamento do betão entre as nervuras do varão, ou seja, após vencida a componente mecânica da aderência. De notar também que, uma vez vencida a componente mecânica da aderência, surge alguma resistência por parte da parcela de aderência por atrito, provocada pelo deslizamento do varão e do betão esmagado contra o betão envolvente.

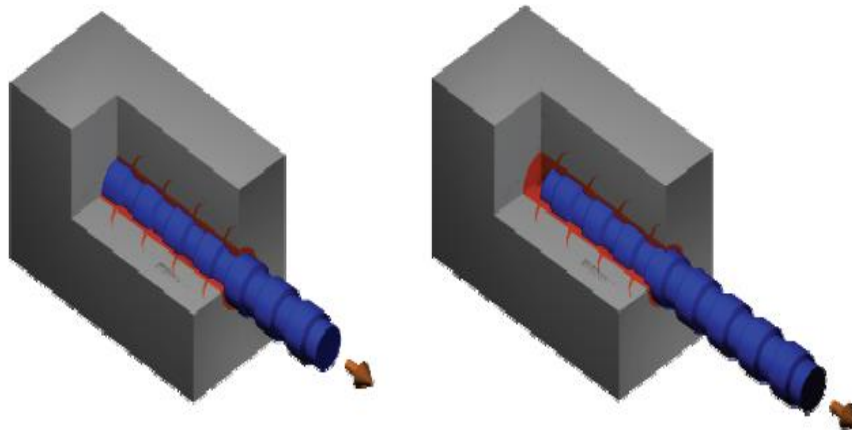


Figura 2.8 - Rotura por *pull-out* (10).

## 2.2 - O Eurocódigo 2 e a aderência aço-betão

Através de uma cuidada análise do Eurocódigo 2 (2) verifica-se que existem vários capítulos que, não tendo como principal objetivo o bom desempenho da ligação aço-betão (a título exemplificativo o cálculo de esforço transversal), as suas considerações contribuem para o bom desempenho da mesma, ajudando a assegurar uma correta transmissão de esforços entre os dois materiais.

Assim, esta análise irá incidir maioritariamente sobre os pontos que têm como principal objetivo a boa prestação da ligação aço-betão ou que, de alguma forma, pretendam minimizar os efeitos de fenómenos que diretamente afetem a mesma, ajudando assim a identificá-los e a referir a sua importância.

## 2.2.1- Durabilidade e recobrimento de armaduras

A corrosão do aço das estruturas de betão armado representa uma das principais causas de deterioração das mesmas, afetando assim a sua durabilidade e, acima de tudo, o seu bom desempenho em serviço. A secção 4 do Eurocódigo 2 (2), “Durabilidade e recobrimento de armadura”, apresenta as Expressões 2.1 e 2.2 que definem a espessura mínima de recobrimento a utilizar, consoante o tempo de vida útil do edifício e a classe de exposição ambiental:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad 2.1$$

Em que o valor do cálculo do recobrimento mínimo é dado pela expressão:

$$c_{min} = \max\{c_{min,b} ; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add} ; 10 \text{ mm}\} \quad 2.2$$

Sendo:

$c_{min,b}$	o recobrimento mínimo para os requisitos de aderência, os quais são dependentes das propriedades dos varões, tais como diâmetro e nervurados ou não;
$c_{min,dur}$	o recobrimento mínimo relativo às condições ambientais;
$\Delta c_{dur,\gamma}$	a margem de segurança;
$\Delta c_{dur,st}$	a redução de recobrimento mínimo no caso de utilização de aço inoxidável;
$\Delta c_{dur,add}$	a redução do recobrimento mínimo no caso de proteção adicional.

Tal como a própria definição de  $c_{min,b}$  indica, existe a necessidade de se garantir que há uma espessura mínima de recobrimento uma vez que uma maior quantidade de betão a envolver o varão de aço não apenas confere melhor proteção às armaduras, como também oferece melhores condições de confinamento e retarda o fenómeno de *splitting*, uma vez que a retração sofrida pelo betão irá garantir esforços confinantes e a fendilhação demorará mais a atingir a superfície do betão. Portanto, o bom desempenho da ligação aço-betão, depende das propriedades dos varões e da qualidade do betão utilizado, que entram na expressão de cálculo de recobrimento mínimo, sendo também notório que o recobrimento mínimo depende essencialmente do diâmetro dos varões utilizados, da existência ou não de agrupamento de varões e da classe de exposição ambiental.

Porém, a espessura mínima de recobrimento prende-se com a proteção dos varões à oxidação e à corrosão, pelo que se irá focar mais essa influência neste capítulo.



### **INFLUÊNCIA DA OXIDAÇÃO E CORROSÃO DOS VARÕES DE AÇO**

A existência de oxidação superficial dos varões de aço ( $0.3-1.5 \text{ g/dm}^2$  de óxido de ferro, segundo Morgan, 1998 (11)) pode melhorar o comportamento da ligação. A existência desta camada superficial de ferrugem deve-se a inúmeros fatores, tais como a sua exposição à humidade, condensação, ou poluição atmosférica antes da sua utilização e betonagem, ou ainda devido ao seu arrefecimento (natural ou rápido, por imersão em água) após saída da linha de produção.

Segundo o Bulletin No. 10 da FIB (12), a presença da referida camada de óxido de ferro melhora as condições de atrito entre os dois materiais, ajudando também na proteção do varão a futuros ataques corrosivos, quando inserido num betão de boa qualidade e devidamente compactado. A existência desta ferrugem assume uma perda de secção do varão de aço, mas sendo esta inferior a 1% do diâmetro nominal do varão é demasiado pequena para ser significativa.

Apesar da oxidação superficial ser um fator benéfico para o comportamento da ligação aço-betão, na presença de corrosão no varão de aço a mesma tornar-se-á prejudicial, como se pode verificar na Figura 2.9, referente ao realizado pelo autor (13). Os iões de cloreto e gases como o oxigénio e dióxido de carbono, conseguem penetrar muito facilmente o betão, através dos seus poros e, uma vez alcançado o varão de aço em contacto com ele, oxidam e destroem a proteção do varão contra a corrosão. Evitar que isto aconteça constitui um dos principais papéis do recobrimento mínimo, que funciona como proteção extra para os varões, consoante os vários tipos de agressores referenciados na formulação acima descrita.



Figura 2.9 – Rotura em ensaios de *pull-out* agravados por corrosão (13).

Os ensaios de *pull-out* executados por vários autores, como por exemplo Cabrera e Ghoddoussi (14), permitiram concluir que a corrosão do varão apenas é benéfica, em termos de aderência, até uma certa percentagem, como se pode verificar na Figura 2.10. As propriedades expansivas dos óxidos de ferro, podem provocar fendilhação e/ou delaminação do betão e, como a corrosão leva à diminuição da área de secção do varão, surge uma camada solta de materiais na interface aço-betão que conduzem à diminuição progressiva da força de ligação.

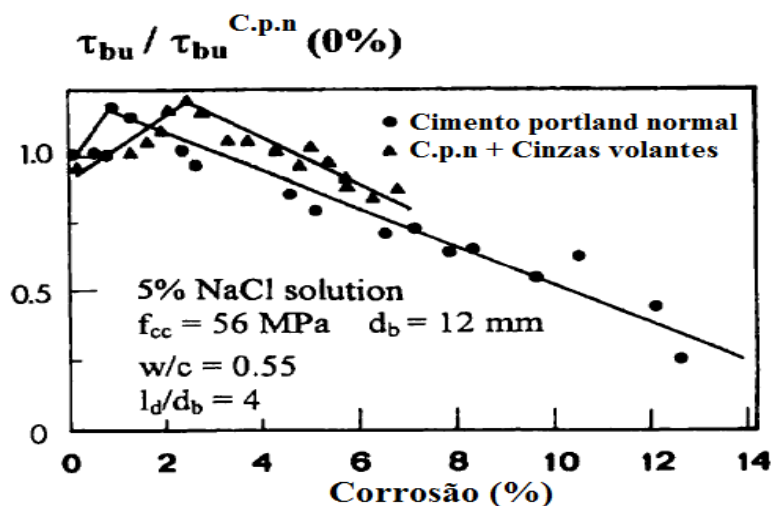


Figura 2.10 - Efeito de perda de secção do varão devido a corrosão, adaptado de (12).

Conclui-se assim que, de uma forma geral, a corrosão avançada no varão é prejudicial para a aderência. Apesar da oxidação superficial ser benéfica, esta apenas será relevante se os varões forem lisos; contudo, no caso de varões nervurados, como a aderência química e por atrito representam uma pequena parte da resistência da ligação aço-betão, verifica-se que a sua contribuição também será muito pequena. Vários autores citados por Ribeiro (15) efetuaram ensaios nesta área, constatando que apenas se verificaram melhorias naqueles em que a rugosidade tinha sido obtida artificialmente.

## 2.2.2 - Amarração de armaduras longitudinais

Segundo a secção 8.4 do Eurocódigo 2 (2), de modo a que seja assegurada uma boa transferência das forças de aderência para o betão, evitando assim a fendilhação longitudinal ou o destacamento do mesmo, as armaduras longitudinais devem ser amarradas conforme a Figura 2.11 ilustra e, caso seja necessário, devem adotar-se armaduras transversais.

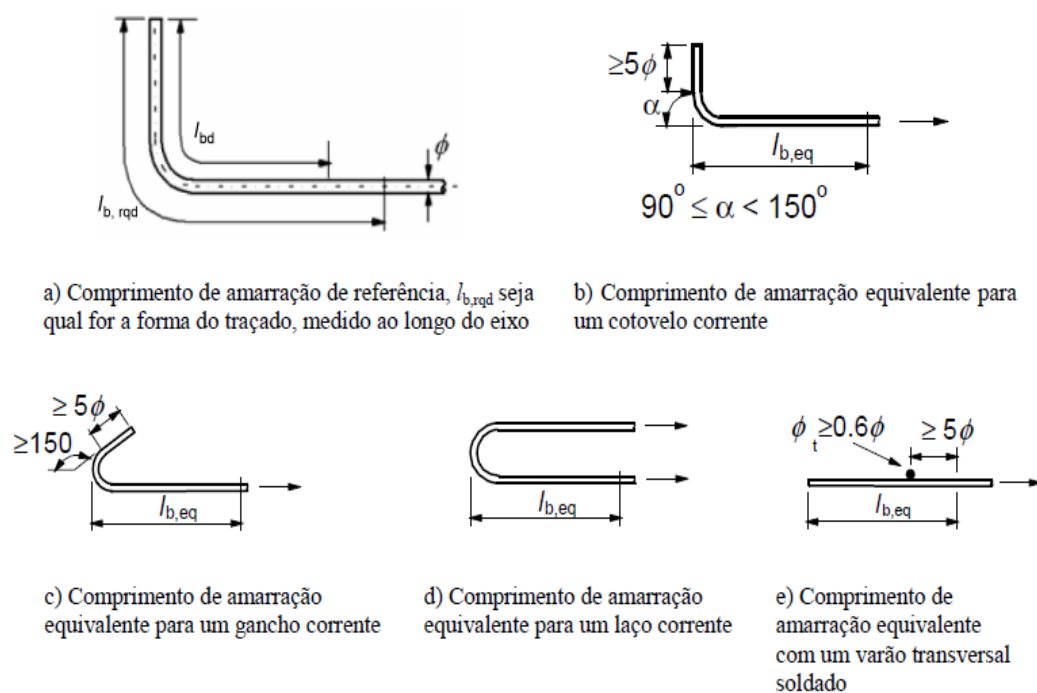


Figura 2.11 - Tipos de amarração para além da de prolongamento reto (2).

O tipo de amarração efetuado aliado a um bom comprimento de amarração, permite uma correta transferência de esforços entre o varão e o betão, essencialmente por meio de aderência mecânica, de modo a que ocorra uma boa interação na ligação aço-betão.

### 2.2.2.1 - Tensão de rotura da aderência

De acordo com a secção 8.4.2 do Eurocódigo 2 (2), a tensão de rotura de aderência,  $f_{bd}$ , de modo a evitar uma rotura de aderência deve ser calculada através da seguinte expressão:

$$f_{bd} = 2.25 \eta_1 \eta_2 f_{ctd} \quad 2.3$$

em que:

$f_{ctd}$  valor de cálculo da resistência do betão à tração. Devido à crescente fragilidade do betão com o aumento da resistência,  $f_{ctk,0.05}$ , deverá ser limitado para o presente efeito ao valor correspondente à classe C60/75, a não ser que possa ser verificado que a tensão de rotura média da aderência aumenta para além desse limite;

$\eta_1$  representa o coeficiente relacionado com as condições de aderência e com a posição do varão durante a betonagem, ilustrada na Figura 2.12. Este coeficiente

toma o valor de 1,0 para boas condições de aderência e de 0,7 para todos os outros casos e para varões em elementos estruturais construídos com cofragens deslizantes;

$\eta_2$  representa um coeficiente relacionado com o diâmetro do varão. Este parâmetro vale 1,0 para varões com diâmetro inferior ou igual a 32 mm, e  $\eta_2 = (132 - \phi) / 100$ , para todos os restantes, sendo  $\phi$  o diâmetro do varão em mm.

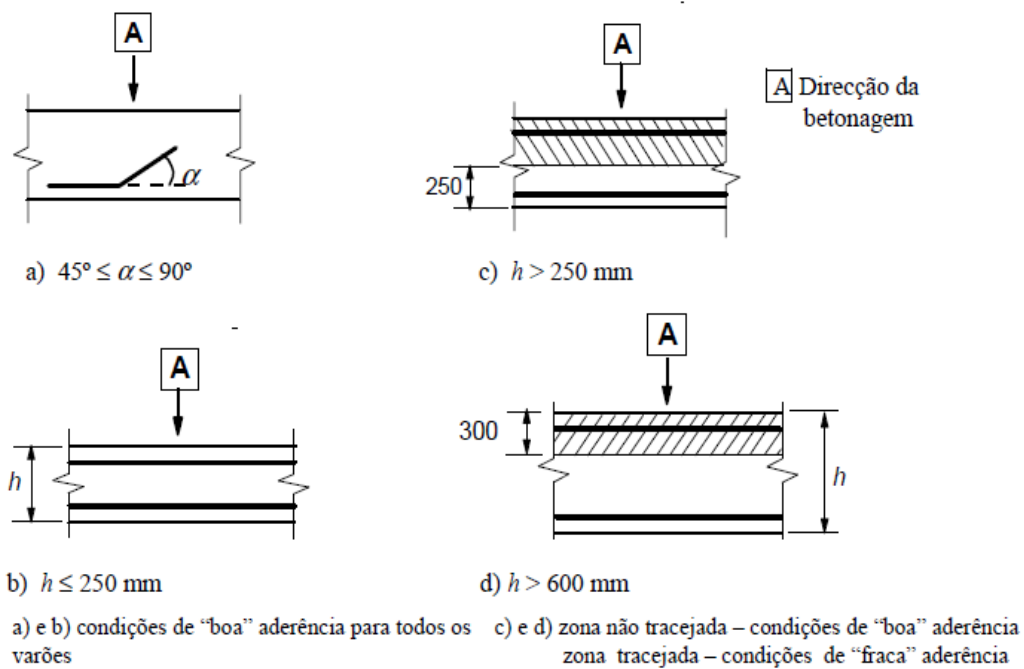


Figura 2.12 - Representação das condições de aderência segundo Eurocódigo 2 (2).

Ou seja, o Eurocódigo 2 (2) identifica claramente que os fatores com maior influência na tensão de rotura da aderência são a qualidade do betão, as condições de betonagem e o diâmetro do varão.

### **INFLUÊNCIA DO BETÃO**

A qualidade do betão desempenha um dos papéis mais importantes na prestação da ligação aço-betão, uma vez que as forças de ligação se encontram maioritariamente relacionadas com a pressão que as nervuras do varão de aço exercem sobre o betão. Assim, o bom desempenho em termos de tensão de aderência está diretamente relacionado com a resistência do betão à compressão e à tração.

Tais conclusões também foram verificadas por Monteiro (16), que efetuou ensaios do tipo *pull-out* em diferentes tipos de betão, chegando à conclusão que a resistência à compressão do betão condiciona fortemente a ligação aço-betão. De acordo com Eligehausen (5), a força de ligação aumenta com a raiz quadrada da força de compressão do betão, ao invés do deslizamento que tende a diminuir muito, tendo quase a mesma raiz quadrada inversa. Os trabalhos publicados por Ducatti e Agopyan (17) assim como Vieira (18), concluem que ocorrendo falha por fendimento do betão, o principal fator que irá condicionar a resistência da ligação, será a resistência do betão à tração, a qual, por sua vez, é proporcional à raiz quadrada da resistência à compressão.

Magnussom (19) enunciado no trabalho de Ana S. Louro (1), realizou ensaios para betões normais e betões de elevada resistência. Os resultados dos ensaios permitiram concluir que, após a armadura entrar em cedência, a aderência local diminui mais significativamente nos provetes com betão de alta aderência, apesar destes terem demonstrado uma maior rigidez local da aderência antes da cedência da armadura com boas condições de confinamento. Estes resultados permitem concluir ao autor que os betões de elevada resistência possuem um comportamento mais frágil, podendo levar a uma rotura prematura da ligação, a menos que sejam utilizadas quantidades suficientes de estribos.

Por sua vez, a posição dos varões relativamente à direção de betonagem também assume grande influência no desempenho da ligação. Os trabalhos de Clark, Ros, Wilkins et al. (20) (21) enunciados no artigo de Daoud e Lorrain (22) referem que betões normais vibrados, betonados na horizontal e com direção de betonagem perpendicular à mesma, possuem melhores condições de aderência entre os dois materiais. Contudo, foi ainda confirmado por Ducatti (17), que os varões de aço posicionados na zona inferior das cofragens possuem melhores condições de aderência que os varões na zona superior da mesma. O autor (17) refere que tal facto está associado ao material mais denso do betão tender a compactar-se na zona inferior da cofragem, ficando o material menos denso e mais poroso na zona superior, o que origina que o betão entre as nervuras do varão seja mais facilmente esmagado. Da mesma forma, os varões posicionados e betonados na vertical, possuem boas características de adesão quando solicitados a esforços perpendiculares à direção de betonagem (com obtenção de valores superiores aos elementos horizontais). Neste último caso, a explicação reside no facto de que por baixo dos varões de aço dispostos horizontalmente tenderá a acumular-se água, a qual, após secagem, originará betão mais poroso, o que não acontece na situação de varões verticais (como a Figura 2.13 ilustra).

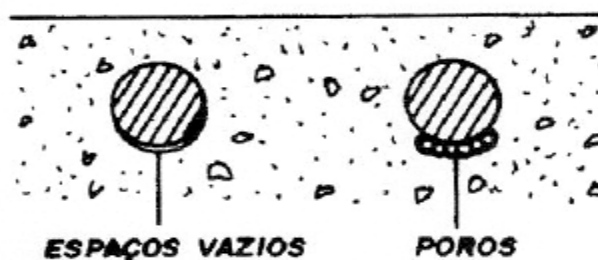


Figura 2.13 - Formação de espaços vazios e/ou poros na zona inferior dos varões horizontais betonados na vertical, devido à acumulação de água (23).

Assim, é possível concluir que para que existam boas condições de aderência aço-betão nos elementos de betão armado, estes devem ser sempre betonados perpendicularmente à direção sob a qual se irão solicitar os esforços, apresentando melhores condições de aderência nos varões localizados na zona inferior das cofragens. É também expectável que devido à acumulação de água por baixo dos varões, os elementos posicionados e betonados verticalmente, quando solicitados na direção perpendicular, apresentem melhores condições de aderência.

### **INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DO VARÃO**

Inúmeros trabalhos foram realizados nesta área, de modo a tentar quantificar a influência do diâmetro dos varões de aço, sendo consensual que as diferenças de valores são pouco significativas, assumindo assim um papel menos importante no desempenho da ligação aço-betão. Ainda assim, é também consensual entre os vários autores que o valor da ligação tende a diminuir ligeiramente com o aumento do diâmetro do varão. Foi verificado pelo trabalho de Eligehausen (5) que varões de 32 mm de diâmetro apresentariam cerca de 10% tensão de aderência a menos que varões de 25 mm, e estes apresentariam também cerca de 10% a menos que os varões de 19 mm.

Estes resultados diferem do que seria inicialmente expectável, uma vez que o aumento da espessura do varão condiciona o aumento da altura e da espessura das nervuras do varão, que, como se explicará mais à frente, possui um dos papéis mais importantes no comportamento da ligação. Autores citados por França na tese de mestrado (23), como Ducatti (17), Soroushian e Choi (24) e Reynolds e Beddy (25), apontam como uma das causas para este fenómeno, apesar da sua complexidade e inúmeras variáveis, o facto de a existência de maiores áreas transversais e longitudinais das nervuras do varão tenderem a acumular mais água, formando um betão mais

poroso o que, associado ao facto da zona da transição ser mais grossa nos varões de maior diâmetro, justifica o decréscimo das tensões de aderência com o aumento do diâmetro dos varões de aço.

Segundo Ana S. Louro (1), foi proposto em 2007 por Bamonte (26) a Expressão 2.4 com o intuito de calcular a tensão de aderência máxima com confinamento, em função do diâmetro ( $d_b$ ) e do diâmetro de referência ( $d_0$ ) dos varões, ajustando-se de uma forma muito satisfatória aos trabalhos de outros autores, nomeadamente ao de Eligehausen (5).

$$\tau_{b,max}^* = \phi(\xi) \times \left[ 0,45 + \psi \times \left( \frac{d_b}{d_0} \right)^{-\beta} \right] \times f_c \quad 2.4$$

em que:

$$\tau_f = \gamma \times f_c \quad 2.5$$

$\psi, \beta, \gamma$  parâmetros da relação local de aderência versus deslizamento, obtidos a partir das seguintes expressões:

$$\psi = 1,1 \times \left( \frac{f_c}{f_{c0}} \right)^{-1} \quad 2.6$$

$$\beta = 0,13 \times \left( \frac{f_c}{f_{c0}} \right) \quad 2.7$$

$$\gamma = 0,4 \times \left( 1 - 0,066 \times \frac{f_c}{f_{c0}} \right) \quad 2.8$$

onde:

$\phi(\xi)$  representa a eficiência do confinamento e varia entre 0,87 e 0,70 para  $d_b$  entre 16 mm e 32 mm;

$f_{c0}$  é o valor de referência da resistência do betão à compressão, de 10 MPa;

$f_c$  é o valor médio da resistência do betão à compressão, entre 35 e 80 MPa.

#### 2.2.2.2 - Comprimento de amarração de referência

O Eurocódigo 2 (2) refere que o cálculo do comprimento necessário de amarração ( $l_{b,rqd}$ ), deve ter em consideração o tipo de aço utilizado, bem como as propriedades de aderência dos varões. Assim, para o cálculo do comprimento de amarração de referência necessário para amarrar uma

força instalada num varão reto, admitindo uma tensão de aderência constante igual a  $f_{bd}$ , deve recorrer-se à expressão:

$$l_{b,rqd} = \left(\frac{\phi}{4}\right) \left(\frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}\right) \quad 2.9$$

em que

$\phi$  representa o diâmetro do varão;

$\sigma_{sd}$  é o valor de cálculo da tensão na secção do varão a partir da qual é medido o comprimento de amarração.

Portanto, da análise da Expressão 2.3 e do anteriormente referido, é de notar que, para além do cálculo de  $f_{bd}$  analisado no ponto anterior e onde entram variáveis como a qualidade do betão, as condições de betonagem e as dimensões dos varões utilizados, também se deve ter em conta o tipo de aço utilizado e as propriedades de aderência dos varões.

### **INFLUÊNCIA DO TIPO DE AÇO E DA GEOMETRIA DAS NERVURAS**

Nos elementos de betão armado sujeitos à tração, a armadura desempenha um papel muito importante, uma vez que será esta a garantir o controlo do comportamento das secções após o fendimento do betão, assegurando um comportamento adequado nas condições de serviço relativamente aos estados limites últimos e contribuindo para a resistência do elemento estrutural. Assim, pode-se afirmar que o comportamento dos edifícios de betão armado, bem como a sua ductilidade, dependem muito do tipo de aço utilizado.

Atualmente, em Portugal, utilizam-se aços cada vez mais dúcteis (laminados a quente), apesar de em alguns casos ainda ser frequente utilizarem-se aços do tipo A500ER endurecidos a frio e, consequentemente, com um grau de ductilidade menor.



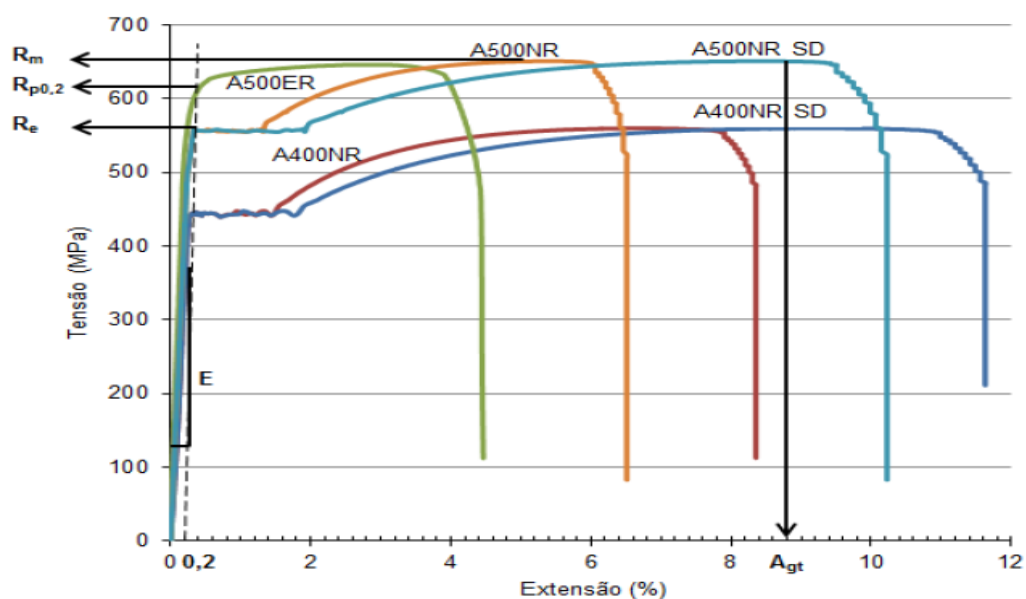


Figura 2.14 - Diagrama de tensão-extensão dos cinco tipos de aço mais utilizados em Portugal (1).

Perante um aumento do nível de ductilidade do aço, os elementos de betão armado beneficiam de vantagens, uma vez que há algum “aviso” em situação de rotura, uma maior capacidade de suportar deformações e maior dissipação de energia sob ações de cargas cíclicas. Tais benefícios levam ao uso cada vez mais corrente de aços laminados a quente, sobretudo em zonas com maior probabilidade de atividade sísmica, uma vez que estes contribuem para um melhor comportamento dos elementos.

Ainda assim, o papel da ligação aço-betão, não pode ser ignorado, uma vez que o desempenho desta ligação possibilita que os dois materiais trabalhem como um só, assegurando assim um controlo do comportamento estrutural global e permitindo um nível de ductilidade adequado. Mas, se por um lado, a segurança necessita que a ligação aço-betão possua boas características mecânicas a nível local, por outro lado, a ductilidade necessita que a ligação permita que o aço deforme de modo a dissipar os esforços pela abertura de fendas secundárias no betão. Podemos, assim, afirmar que existe uma discrepância entre as condições necessárias para possuir uma boa ligação aço-betão e os requisitos necessários para existirem boas condições de ductilidade.

Analisando o problema do ponto de vista da entrada em cedência da armadura numa situação de tração, a aderência entre os dois materiais irá diminuir devido ao efeito de Poisson, o que levará à diminuição da secção do varão de aço, reduzindo assim a área de contacto entre o betão e o varão. Seguindo o mesmo raciocínio, em caso de compressão, a aderência tenderá a apresentar melhores valores devido ao aumento de secção do varão que se irá comprimir contra o betão,

assegurando assim uma ligação melhor, quer em termos de aderência mecânica quer em aderência por atrito.

Como referido anteriormente, também a geometria dos varões, nomeadamente as características das suas nervuras, possui um papel muito importante no comportamento da ligação. Segundo o Eurocódigo 2 (2), apenas é permitida a utilização de varões de aço nervurados, evidenciando assim que a componente de aderência mecânica é a que mais contribui para o sucesso da ligação aço-betão.

É sabido que para controlar a fendilhação do betão, e uma vez que atualmente se utilizam apenas aços de alta aderência, existe a necessidade que a transmissão de esforços entre os varões de aço e betão se faça em boas condições e no menor comprimento possível. Surge, assim, a necessidade de utilizar varões nervurados maximizando a aderência entre os dois materiais, requisito que os varões lisos não conseguem cumprir, sendo, portanto, afastada a sua utilização no Eurocódigo 2. A utilização de varões lisos traria como consequência a abertura elevada de fendas, o que, além de esteticamente inaceitável, coloca em causa as condições de segurança por possível corrosão das armaduras.

Por sua vez, como foi visto nos parágrafos anteriores, a aderência encontra-se também diretamente relacionada com a ductilidade das estruturas, uma vez que a capacidade de limitar a formação de rótulas plásticas depende muito da capacidade de dissipação de energia e da manutenção da aderência entre os varões de aço e o betão.

Nos perfis nervurados, os parâmetros tidos em conta de forma a caracterizar a aderência dos varões são dados na Expressão 2.10, presente em (27), que representa a área relativa das nervuras transversais ( $f_R$ ), uma vez que será a mesma que irá ser pressionada contra o betão envolvente aumentando assim a parcela de aderência mecânica entre os dois materiais, condicionando a transferência de esforços entre estes. Este fenómeno evidencia, assim, que a tensão de aderência entre o aço e o betão é diretamente proporcional ao valor da área relativa das nervuras transversais.

$$f_R = \frac{A_r}{\pi \times d_b \times c} \quad \mathbf{2.10}$$

em que:

$A_r$  é a área da projecção da nervura da secção transversal do varão;

$d_b$  representa o diâmetro nominal do varão;

c a distância entre o centro de duas nervuras.

Constata-se então que a resistência da ligação depende da combinação apropriada da altura das nervuras (a), do espaçamento entre nervuras (c) e do diâmetro do varão (d).

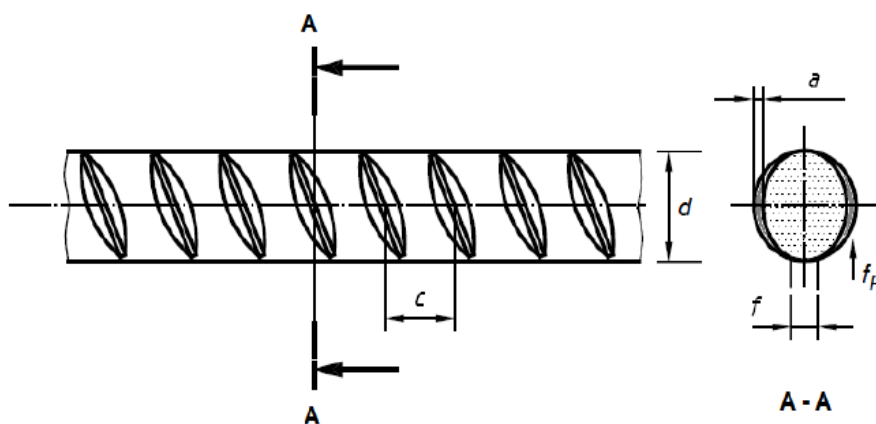


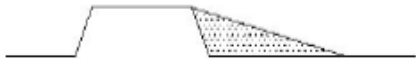

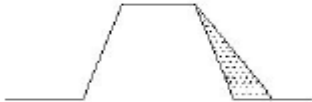
Figura 2.15 - Parâmetros de consideração de perfis nervurados (1).

Ao longo dos anos desenvolveram-se diversos estudos, nomeadamente por Wernisch (28) e Goto (29), sendo da conclusão geral que, para maximizar a performance da ligação, deve-se diminuir o espaçamento entre nervuras e aumentar a altura das mesmas, sendo assim expectável um comportamento de aderência idêntico sempre que a área relativa das nervuras seja igual e estas possuam um ângulo dos flancos ( $\alpha$ ) superior a  $30^\circ$ . Ainda assim, de um estudo mais recente dos autores Darwin e Graham (30), que procuraram pesquisar os efeitos da geometria das nervuras na ligação, conclui-se que a resposta em termos de aderência é função da área relativa das nervuras e é independente da combinação entre a altura e o espaçamento (sob condições de confinamento médio a elevado). Por sua vez, em condições de baixo confinamento, onde a rotura irá ocorrer por fenómenos de *splitting*, a aderência é completamente independente da geometria das nervuras.

Como referido no parágrafo anterior, também o ângulo dos flancos das nervuras assume um papel importante, uma vez que quando estas possuem uma inclinação inferior a  $30^\circ$ , podem originar a existência de escorregamento. Por sua vez, aquando de uma inclinação superior a  $45^\circ$ , é muito provável a ocorrência de esmagamento prematuro do betão em contacto com as nervuras. Assim, para valores de aderência ótimos, as nervuras devem possuir uma inclinação entre  $30^\circ$  e  $45^\circ$ .

Esta influência também foi estudada pelos autores Choi e Lee (31), que relacionaram o ângulo dos flancos ( $\alpha$ ) enunciado na página anterior (e consequente altura das nervuras) com o modo de rotura da ligação, de forma a perceber a qualidade da ligação que se obteria com a alteração destas variáveis, aquando da utilização de um confinamento elevado. O Quadro 2.1, resume os dados recolhidos pelos autores.

Quadro 2.1 - Relação da altura das nervuras com o modo de rotura e a resistência da ligação, quando utilizado um confinamento elevado, adaptado de (31).

Tipo de nervura	Forma de esmagamento	Modo de rotura	$\alpha$	Força da ligação
Baixa		<i>Pull-out</i>	Baixo	Baixo
Média		<i>Splitting</i>	Médio	Médio
Alta		<i>Splitting</i>	Alto	Alto

Segundo as especificações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (32) (33) (34) (35) (36), aplicáveis em Portugal, a área das nervuras transversais deve ser obtida pela fórmula da Parábola, dada pela seguinte expressão:

$$f_R = \frac{2 a_m}{3\pi \times d \times c} \times (\pi \times d - \sum f_i) \quad 2.11$$

em que:

$a_m$  representa a média das alturas das nervuras transversais dos dois lados dos varões;

$d$  representa o diâmetro nominal do varão;

$c$  é a distância entre o centro de duas nervuras consecutivas;

$\sum f_i$  representa o perímetro da secção sem nervuras transversais.

Apesar de vários autores apresentarem valores para a área relativa das nervuras, tais como Rehm (37)  $f_R=0,070$  ou Soretz/Holzenwein (38)  $f_R=0,065$ , na generalidade, os valores de  $f_R$  entre 0,050 e 0,100 representam um bom compromisso em termos de estados limites últimos, o fenómeno de *splitting*, os requisitos industriais e os estados limites de utilização.

### 2.2.2.3 - Comprimento de amarração de cálculo

Segundo o Eurocódigo 2 (2), o comprimento de amarração de cálculo ( $l_{bd}$ ), deve ser obtido através do uso da seguinte expressão, encontrando-se os valores aconselháveis de  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  e  $\alpha_5$  no Quadro 2.2.

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{b,rqd} \geq l_{b,min} \quad 2.12$$

em que:

- $\alpha_1$  tem em conta o efeito da forma dos varões admitindo um recobrimento adequado (Figura 2.12);
- $\alpha_2$  tem em conta o efeito de recobrimento mínimo de betão (Figura 2.16);
- $\alpha_3$  tem em conta o efeito de cintagem das armaduras transversais;
- $\alpha_4$  tem em conta a influência de um ou mais varões transversais soldados ( $\phi_t > 0.6 \phi$ ) ao longo do comprimento de amarração de cálculo  $l_{db}$ ;
- $\alpha_5$  tem em conta o efeito da pressão ortogonal ao plano de fendimento ao longo do comprimento de amarração de cálculo;
- $l_{b,rqd}$  é obtido pela Expressão 2.9;
- $l_{b,min}$  é o comprimento de amarração mínimo, que se não existir outra limitação toma o valor de  $l_{b,min} \geq \max\{0,3 l_{b,rqd} ; 10 \phi ; 100 \text{ mm}\}$  para amarrações de varões tracionados, ou de  $l_{b,min} \geq \max\{0,6 l_{b,rqd} ; 10 \phi ; 100 \text{ mm}\}$  para o caso de varões comprimidos.

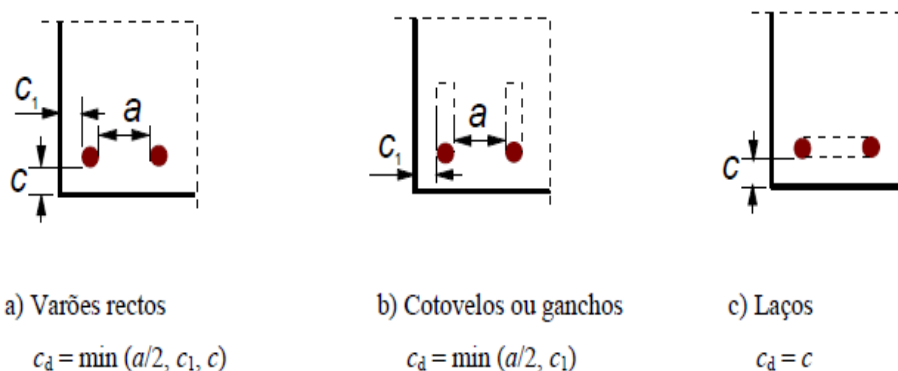


Figura 2.16 - Valores de  $c_d$  tendo em conta o efeito de recobrimento mínimo do betão segundo Eurocódigo 2 (2).

Quadro 2.2 - Valores dos coeficientes  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  e  $\alpha_5$  (Quadro 8.2 do Eurocódigo 2).

Factor de influência	Tipo de amarração	Armadura para betão armado	
		Tracionada	Comprimida
Forma dos varões	Reta	$\alpha_1 = 1,0$	$\alpha_1 = 1,0$
	Outra não reta	$\alpha_1 = 0,7$ se $c_d > 3\phi$ caso contrário $\alpha_1 = 1,0$	$\alpha_1 = 1,0$
Recobrimento das armaduras	Reta	$\alpha_2 = 1 - 0,15 (c_d - \phi) / \phi$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	$\alpha_2 = 1,0$
	Outra não reta	$\alpha_2 = 1 - 0,15 (c_d - 3\phi) / \phi$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	$\alpha_2 = 1,0$
Cintagem das armaduras transversais não soldadas à armadura principal	Todos os tipos	$\alpha_3 = 1 - K\lambda$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	$\alpha_3 = 1,0$
Cintagem das armaduras transversais soldadas	Todos os tipos, posições e diâmetros	$\alpha_4 = 0,7$	$\alpha_4 = 0,7$
Cintagem por compressão transversal	Todos os tipos	$\alpha_5 = 1 - 0,04p$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	-

Salienta-se que o valor adotado por cada um dos coeficientes utilizados para cálculo do comprimento de amarração tem como principal condicionante para os seus valores, o facto de os

varões se encontrarem à tração ou à compressão. Este aspeto é de particular relevância para este trabalho uma vez que os estudos existentes para este fenómeno são efetuados com os varões à tração.

Os coeficientes  $\alpha_1, \alpha_2$  e  $\alpha_4$  e as suas condicionantes encontram-se já explícitos nos pontos anteriores, faltando ainda explicar o papel do confinamento  $\alpha_3$  e das pressões ortogonais ao plano de fendimento  $\alpha_5$ , possuindo em ambos os casos um papel muito importante na ligação viga-pilar.

### **INFLUÊNCIA DO CONFINAMENTO E DAS PRESSÕES ORTOGONAIS AO PLANO DE CONFINAMENTO**

Através da análise deste assunto, pode-se concluir que os índices  $\alpha_3$  e  $\alpha_5$  do Eurocódigo 2 (2) se encontram diretamente relacionados entre si, embora  $\alpha_5$  se encontre mais direccionado para o papel do confinamento activo e  $\alpha_3$  do confinamento passivo.

O autor Dominguez (10), define confinamento como a soma das forças de compressão que atuam na direção normal à superfície de contacto entre o varão de aço e o betão. Assim, o confinamento produzido por estas forças funciona como uma pressão lateral, ou transversal, aplicada ao elemento estrutural.

Apesar de possuírem os mesmos objetivos, o confinamento ativo é o nome designado para as forças impostas associadas à interação com outros elementos estruturais, como é o caso numa ligação viga-pilar em que as armaduras contínuas do pilar assumem um papel confinante, ou ainda pela aplicação de forças laterais. Por outro lado, o confinamento passivo está relacionado com o confinamento produzido pelo efeito da armadura transversa.

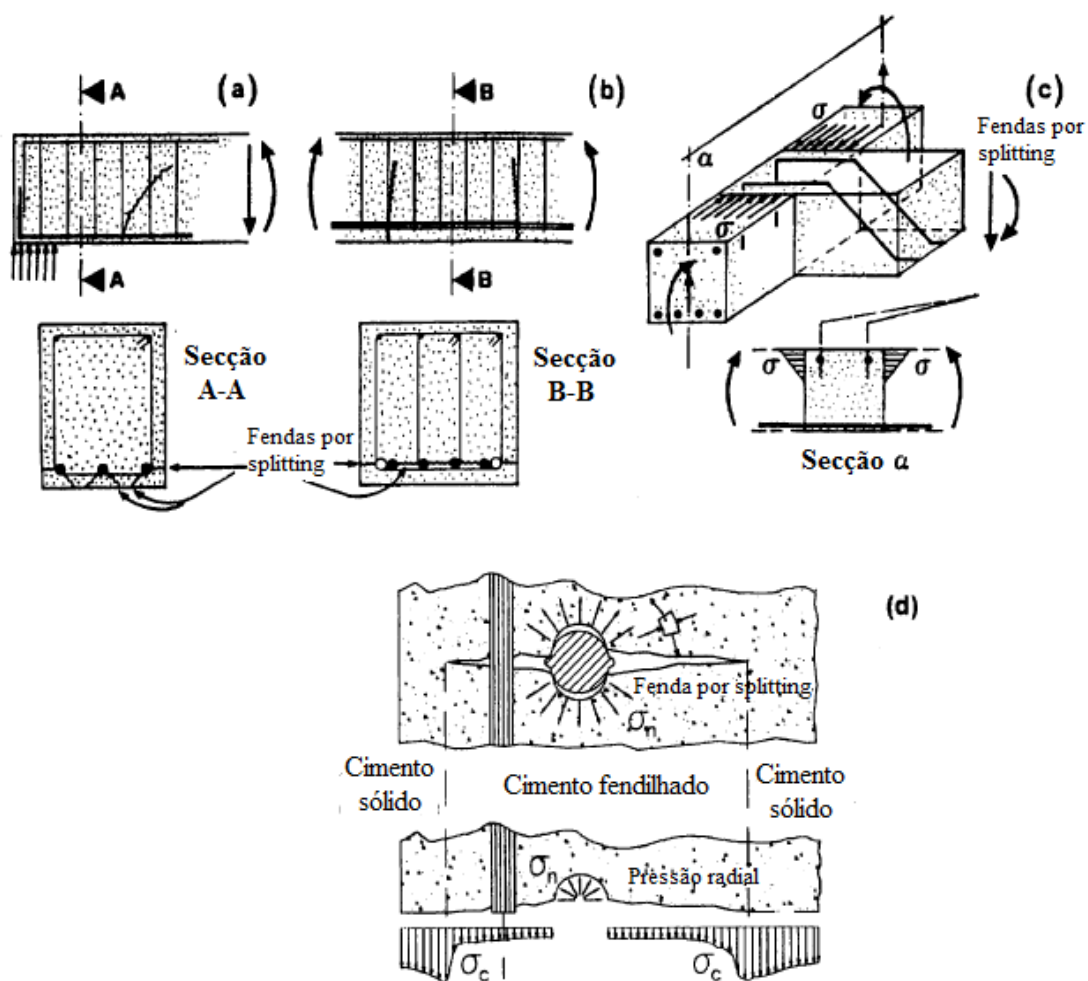


Figura 2.17 - Exemplos da interação confinamento-ligação: a) amarração de varões (confinamento em parte ativo e em parte passivo); b) emenda sobreposta de varões (confinamento passivo por parte dos estribos); c) confinamento típico de uma ligação viga-pilar (confinamento activo); d) exemplo de fendimento e ações confinantes em torno do varão de aço, adaptado de (27).

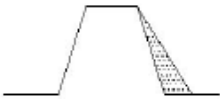
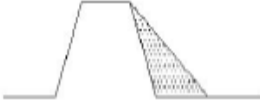
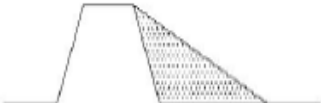
Independentemente do tipo de confinamento aplicado, o principal papel do confinamento é evitar que a fendilhação se espalhe, prevenindo o fenómeno de *splitting* e aumentando a componente de atrito entre o varão de aço e o betão envolvente.

Os elementos estruturais sem reforço por confinamento desenvolvem fissuras longitudinais mais facilmente e ocorre falha por *splitting* para tensões relativamente baixas. De notar que após o fenómeno de *splitting*, existe uma queda quase imediata da resistência da ligação, sobrando apenas forças de aderência por atrito que rapidamente também levam a resistência da ligação a zero.



Os autores Choi e Lee (31), também efectuaram estudos onde tinham como principal objectivo descobrir o tipo de contribuição que o confinamento irá conferir à ligação. Os autores concluíram que os elementos devidamente confinados apenas apresentam rotura por *pull-out*, como se pode observar no quadro seguinte.

Quadro 2.3 - Relação do nível de confinamento com o modo de rotura e a resistência da ligação, aquando da utilização da mesma altura das nervuras, adaptado de (31).

Tipo de confinamento	Forma de esmagamento	Modo de rotura	$\alpha$	Força da ligação
Baixo		<i>Splitting</i>	Elevado	Baixo
Médio		<i>Splitting</i>	Médio	Médio
Alto		<i>Pull-out</i>	Baixo	Alto

Também os resultados obtidos por Eligehausen (5), mostram que os elementos devidamente confinados rompem apenas por *pull-out*, o que se traduz num aumento da resistência de ligação dos dois materiais em cerca de 33%, quando comparado com a inexistência de confinamento. Foi também provado pelo mesmo autor que a partir de um certo limite de confinamento, os valores da resistência da ligação não iriam ter resultados mais elevados, realçando assim a conclusão de que o principal papel do confinamento é prevenir a fendilhação e evitar o fenómeno de *splitting*. Este autor, (5), sugere que o cálculo da tensão necessária na armadura de confinamento deve ser obtida através da Expressão 2.13.

$$\sigma_{sv} = 0.3 \frac{A_s}{\Sigma A_{sv}} \sigma_s \quad 2.13$$

em que:

$\sigma_{sv}$  é a tensão no reforço vertical;

$\sigma_s$  representa a tensão aplicada ao varão de aço;

$A_s$  refere-se à área do varão;

$A_{sv}$  representa a área de influência das barras verticais.

### **INFLUÊNCIA DA HISTÓRIA DE CARGA DOS ELEMENTOS**

A história de carga a que um elemento de betão armado é sujeito, nomeadamente a velocidade de aplicação, o tipo de carga, a frequência e o sentido, tem um impacto muito significativo na resistência da ligação, afetando a relação entre a tensão de aderência e deslizamento da mesma. Embora estes sejam fatores que não se encontrem muito referenciados em Eurocódigo 2 (27), e estejam mais especificados no Model Code 2010 (27), é pertinente tecer já algumas considerações.

O facto de o tipo de carregamento influenciar a relação tensão de aderência *versus* deslizamento da ligação, leva a que esta variável também seja importante no modo de rotura da ligação. Um dos exemplos mais significativos desta condicionante é a falha por *pull-out*, que está maioritariamente relacionada com o esmagamento do betão que se encontra entre as nervuras do varão e o alisamento da mesma. Isto porque a fadiga induzida por ciclos do tipo *low-cycle* (que se aproxima mais do tipo de esforços induzidos por um sismo na estrutura, ou seja, de curta duração e grande amplitude) irão ser mais condicionantes para a degradação da ligação aço-betão, sendo particularmente gravoso aquando da inversão do sentido do deslizamento, levando cada inversão a uma redução significativa da resistência da ligação. Por último, também não pode ser menosprezada a influência da velocidade de aplicação de uma determinada carga, uma vez que os resultados obtidos por Eligehausen (5) revelaram que a tensão de aderência aumenta à medida que aumenta a velocidade do carregamento.

### **A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA**

Outro dos pontos que não é focado no Eurocódigo 2 (2), é o impacto que as temperaturas elevadas (provocadas por fogos) ou as temperaturas baixas (provocadas por ambientes árticos e condições criogénicas) podem ter na ligação aço-betão. Embora em ambos os casos sejam necessários mais estudos, as informações disponibilizadas por estudos existentes são ainda muito limitados, quer pela complexidade que estes apresentam, quer pelos custos elevados associados ao trabalho experimental necessário.

Os ensaios para caracterizar aderência a temperaturas elevadas são particularmente difíceis, dispendiosos e, por isso, raros. Em geral, cada ensaio consiste num ciclo de alta temperatura,

composto por um aquecimento até temperaturas entre os 100°C a 800°C, sendo de seguida mantido a temperatura constante durante algum tempo, procedido por um arrefecimento lento e constante até à temperatura ambiente. Os principais parâmetros estudados neste tipo de ensaios são o tipo de agregados e a sua proporção, a forma do elemento e as suas condições de cura, bem como a superfície do varão de aço e o seu diâmetro.

Este ciclo a temperaturas elevadas levará a que o cimento do betão sofra alterações a nível da sua composição química, da sua estrutura física e da relação água/cimento, originando a abertura de fendas, a redução de resistência e, consequentemente, a alteração da capacidade de deformação plástica. Todas estas alterações influenciam a resistência da ligação e consequentemente o comportamento de toda a estrutura.

Os autores Bazant & Kaplan (39) efetuaram estudos nesta área tendo concluído que a resistência da ligação diminui com o aumento da temperatura, sendo essa redução mais acentuada nos varões lisos que nos varões nervurados, e que o diâmetro dos varões utilizados em pouco ou nada influencia os resultados. O mesmo autores (39), concluíram relativamente ao betão que, quanto maior fosse a quantidade do betão a envolver o varão, menos afetada seria a resistência da ligação. Contudo, a influência da resistência do betão original é errática, sendo o tipo de agregado o principal fator a assegurar a resistência da ligação, uma vez que quanto mais elevada a estabilidade térmica do agregado, menores serão os danos causados ao betão. Apesar do estudo aprofundado pelos autores, não foi possível retirar nenhuma conclusão relativamente à relação água/cimento, mas foi possível concluir que a utilização de técnicas humidificantes durante o processo de cura do betão leva a uma resistência da ligação mais baixa, quando esta se encontra sujeita a temperaturas elevadas.

Mais recentemente, Lublőy & Balázs (40), efetuaram ensaios cíclicos expondo provetes a temperaturas de 20°C, 150°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C e 800°C, seguido de arrefecimento lento e constante. Neste trabalho constatou-se que as reduções mais consideráveis de resistência ocorreram para valores a partir dos 400/500°C, o que pode ser explicado com a decomposição da “Portlandite”, que se dá a cerca de 450°C. Embora a diferentes níveis, também foi possível concluir que a resistência média do betão foi praticamente linear para valores abaixo dos 400°C e acima dos 500°C. Verifica-se também pelos diagramas de tensão de aderência *versus* deslizamento (Figura 2.18 e Figura 2.19) que após os 400/500°C a componente de aderência por adesão perde-se, havendo uma redução no valor das tensões.

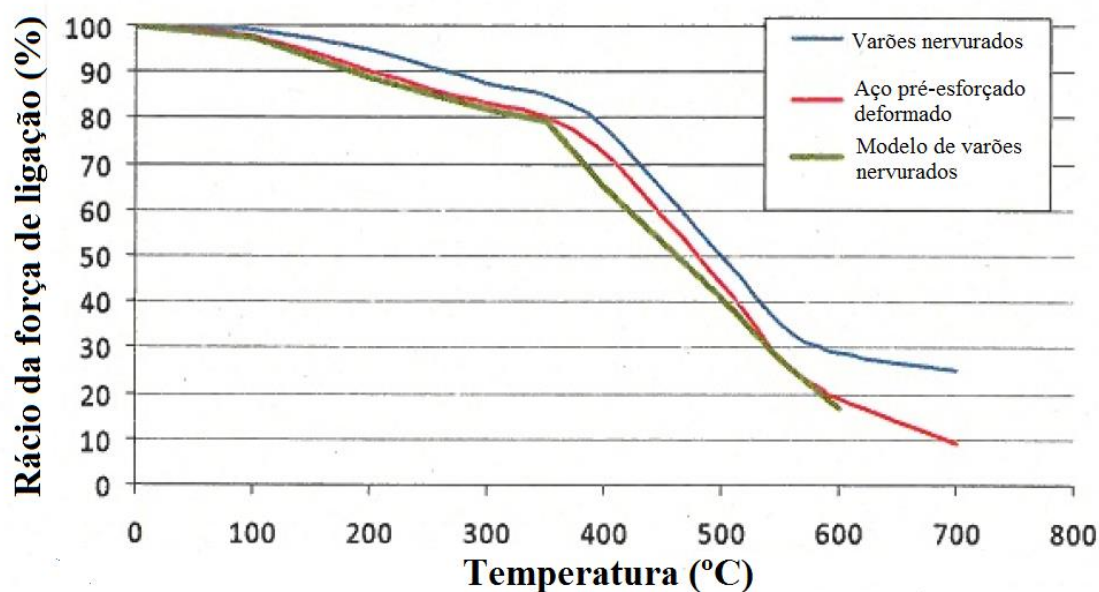


Figura 2.18 - Degradação da ligação aço-betão a altas temperaturas com utilização de varões nervurados, adaptado de (40).

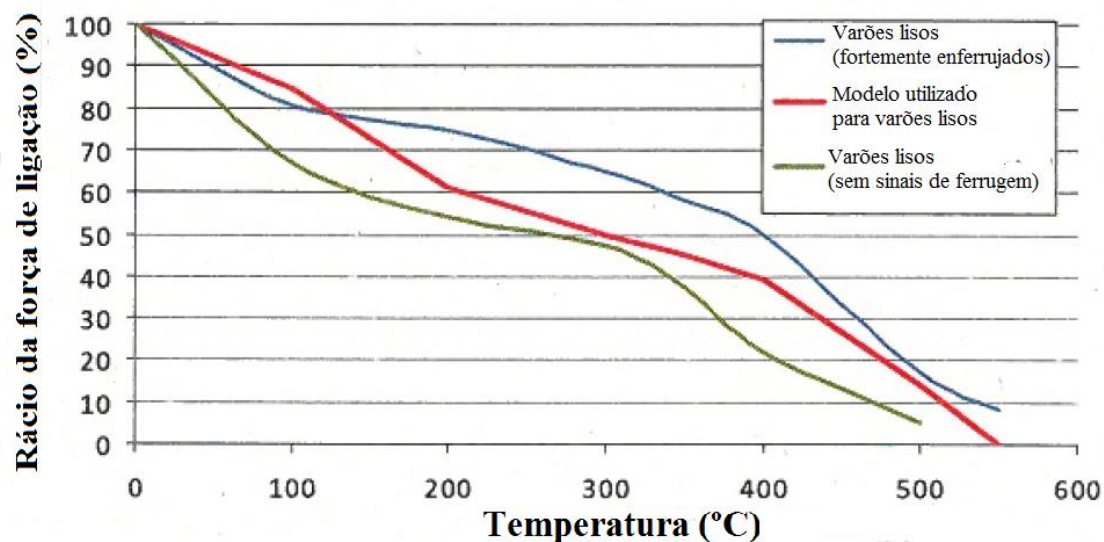


Figura 2.19 - Degradação da ligação aço-betão a altas temperaturas com utilização de varões lisos, adaptado de (40).

Para condições de temperaturas baixas, os intervalos de estudo têm-se centrado em valores entre os  $-50^{\circ}\text{C}$  e os  $-150^{\circ}\text{C}$ . Analogamente ao estudo de temperaturas elevadas, esta é uma área que requer mais desenvolvimentos.

Quando a temperatura é tão baixa, existe a possibilidade de formação de gelo que, com os seus cristais, leva ao aumento de volume, podendo originar fendilhação e/ou destacamento do betão.

Todos estes fenómenos são muito prejudiciais para o betão e, consequentemente, para a resistência da ligação, pelo que a utilização de betões a estas temperaturas requer que os mesmos sejam, para além de outros cuidados necessários, pouco porosos.

O trabalho experimental desenvolvido por Van de Veen (41), permite concluir que quando o betão não é afetado pelo fenómeno de formação de gelo, a resistência da ligação é sempre mais elevada a baixas temperaturas do que à temperatura ambiente, uma vez que a resistência do próprio betão em si aumenta a temperaturas baixas. Este autor (41), refere ainda que para além da temperatura, a humidade possui um papel muito relevante no desempenho da ligação entre os dois materiais.

## **2.3 – Model Code 2010 e a aderência aço-betão**

No Model Code 2010 (27), a aderência aço-betão é focada essencialmente no capítulo 6, onde se referem os parâmetros que influenciam a resistência de ligação aço-betão e a relação tensão de aderência *versus* deslizamento relativo a um determinado tipo de solicitação. Deve ser sublinhado que a referida relação tensão de aderência-deslizamento, não representa o comportamento global da ligação mas sim o seu comportamento local, daí serem tidos em maior consideração os resultados obtidos pelos autores que utilizam um comprimento aderente na ordem de grandeza de 5 a 6 vezes o diâmetro do varão utilizado.

De um modo geral os parâmetros que influenciam a prestação da ligação entre os dois materiais, bem como as considerações feitas pelo Model Code 2010 (27) sobre esta ligação, encontram-se em concordância com o descrito e especificado em Eurocódigo 2 (2). A principal diferença entre os dois documentos evidenciados, reside no facto de o Model Code 2010 (27) dar especial importância à história de carga e à explicação da influência desta variável na prestação da ligação entre o betão e o aço.

Deste modo, é feita a distinção entre dois regimes de carga aplicada: o carregamento efetuado em regime monotónico e em regime cíclico. Resumidamente e com o intuito de pré-descrever os dois tipos de regimes, considera-se que o regime é monotónico quando se está na presença de cargas aplicadas de forma suficientemente lenta para não ocorrerem efeitos dinâmicos e sempre com a ação no mesmo sentido. Por sua vez, o regime cíclico difere apenas do anterior no facto

de se fazer inversão do sentido de aplicação das cargas, podendo ou não inverter-se o sinal da tensão de aderência.

Considerando que o regime monotónico apresenta especial interesse no âmbito deste trabalho, descreve-se na secção seguinte o mecanismo de mobilização da aderência em regime monotónico.

### 2.3.1- Regime Monotónico

Para as situações de cargas em regime monotónico, as tensões de aderência em função do deslocamento entre o betão e o varão de aço, são obtidas pela Expressão 2.14, sendo o comportamento da ligação caracterizado pelo gráfico da Figura 2.20.

$$\begin{cases} \tau_0 = \tau_{\max} \left( \frac{s}{s_1} \right)^\alpha & \text{para } 0 \leq s \leq s_1 \\ \tau_0 = \tau_{\max} & \text{para } s_1 \leq s \leq s_2 \\ \tau_0 = \tau_{\max} - (\tau_{\max} - \tau_f) \frac{(s - s_2)}{(s_3 - s_2)} & \text{para } s_2 \leq s \leq s_3 \\ \tau_0 = \tau_{\max} & \text{para } s_3 \leq s \end{cases} \quad 2.14$$

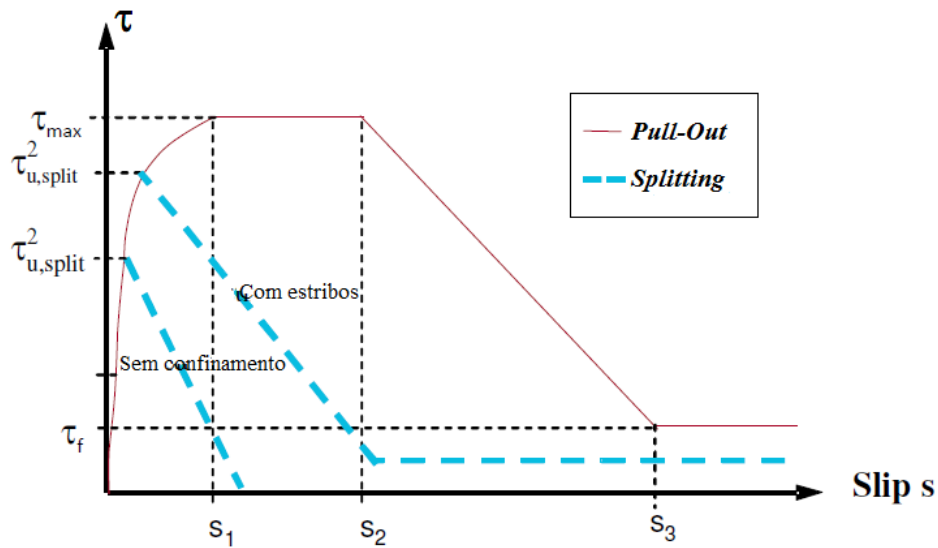


Figura 2.20 - Curvas de tensão de aderência *versus* escorregamento, adaptado de Model Code (27).

No Quadro 2.4, podemos encontrar os valores das tensões de aderência, para diferentes valores de parâmetros e condições.

Quadro 2.4 - Valores de tensão de aderência, adaptado do Model Code 2010 (27).

	<b><i>Pull-Out</i></b>		<b><i>Splitting</i></b>			
	$\varepsilon_s < \varepsilon_{s,y}$		$\varepsilon_s < \varepsilon_{s,y}$			
	Boas condições de ligação	Outras condições de ligação	Boas condições de ligação		Outras condições de ligação	
			Sem confinamento	Com estribos	Sem confinamento	Com estribos
$\tau_{\max}$	$2,5 \sqrt{f_{cm}}$	$1,5 \sqrt{f_{cm}}$	$7,0 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{25}\right)^{0,25}$	$8,0 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{25}\right)^{0,25}$	$5,0 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{25}\right)^{0,25}$	$5,5 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{25}\right)^{0,25}$
$s_1$	1,0 mm	1,8 mm	$s(\tau_{\max})$	$s(\tau_{\max})$	$s(\tau_{\max})$	$s(\tau_{\max})$
$s_2$	2,0 mm	3,6 mm	$s_1$	$s_1$	$s_1$	$s_1$
$s_3$	$c_{\text{clear}}$	$c_{\text{clear}}$	$1,2 s_1$	$0,5 c_{\text{clear}}$	$1,2 s_1$	$0,5 c_{\text{clear}}$
$\alpha$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$\tau_f$	$0,4 \tau_{\max}$	$0,4 \tau_{\max}$	0	$0,4 \tau_{\max}$	0	$0,4 \tau_{\max}$

Para diferentes valores de deslizamento, o Bulletin 10 da *Fédération Internationale du Béton* (12), define que no diagrama tensão de aderência *versus* deslizamento, consoante as condições existentes, é possível distinguir 4 fases distintas, consoante se pode ver na Figura 2.21.

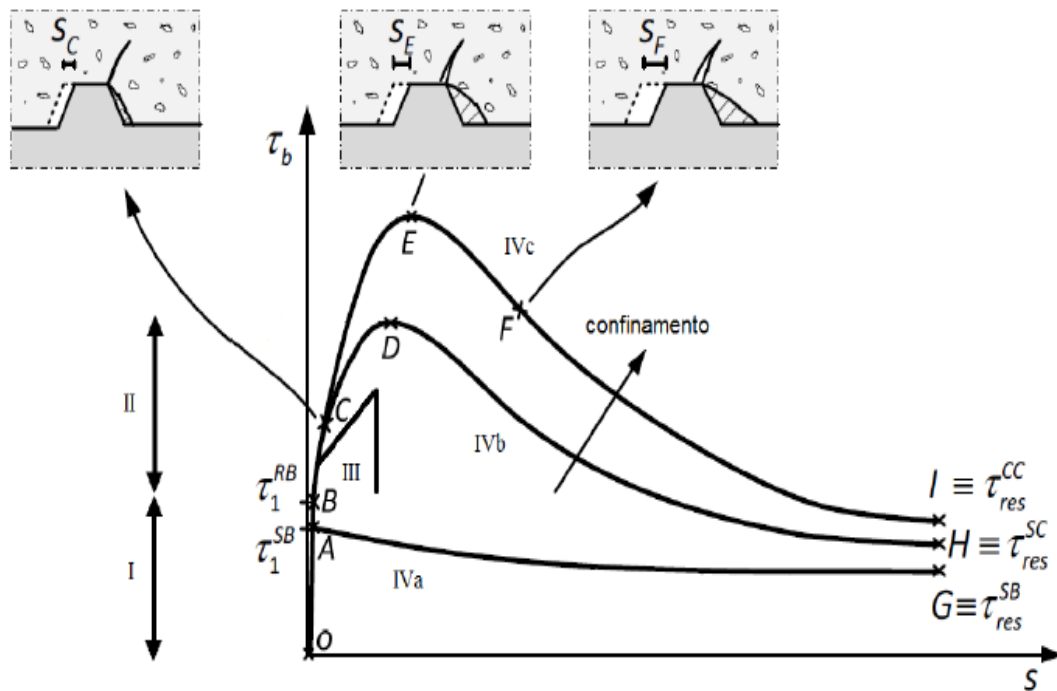


Figura 2.21 – Modelos de tensão de aderência *versus* escorregamento (1).

### **Fase I – Betão não fendilhado**

Esta primeira fase dá-se para valores em que a sollicitação é baixa  $\tau_1 \leq \tau_2 = (0.2 - 0.8)f_{ct}$ . Não ocorrendo fendilhação do betão, a eficiência da ligação é assegurada maioritariamente pelas ligações químicas de aderência, havendo a possibilidade de uma pequena contribuição micromecânica devido à rugosidade superficial do varão de aço. O fenómeno de deslizamento existente é muito pequeno e surge maioritariamente devido à deformação do betão sob a acção da carga transmitida pela armadura, o que resulta também numa concentração de esforços maioritariamente localizados nas pontas das nervuras.

Contudo, ambos os fenómenos de adesão atrás enunciados, possuem uma contribuição muito pequena para a boa prestação da ligação no geral, o que pode ser verificado pelo fraco desempenho da ligação aço-betão de varões lisos, em que são estes dois fenómenos que asseguram maioritariamente as forças de ligação.

### **Fase II – Ocorrência da primeira fendilhação**

Nesta fase, em que já entram valores de sollicitação mais elevados  $\tau > \tau_1$ , a ligação química falha. Assim, surge o aparecimento de micro fendilhação transversal ao topo das nervuras, devido ao acumular de esforços por compressão induzidos nesses pontos, permitindo que ocorram maiores valores de deslizamento. Contudo, nesta fase, a acção das nervuras ainda é limitada, não ocorrendo assim o fenómeno de *splitting*.



Figura 2.22 - Exemplo de rotura por *splitting* (42).

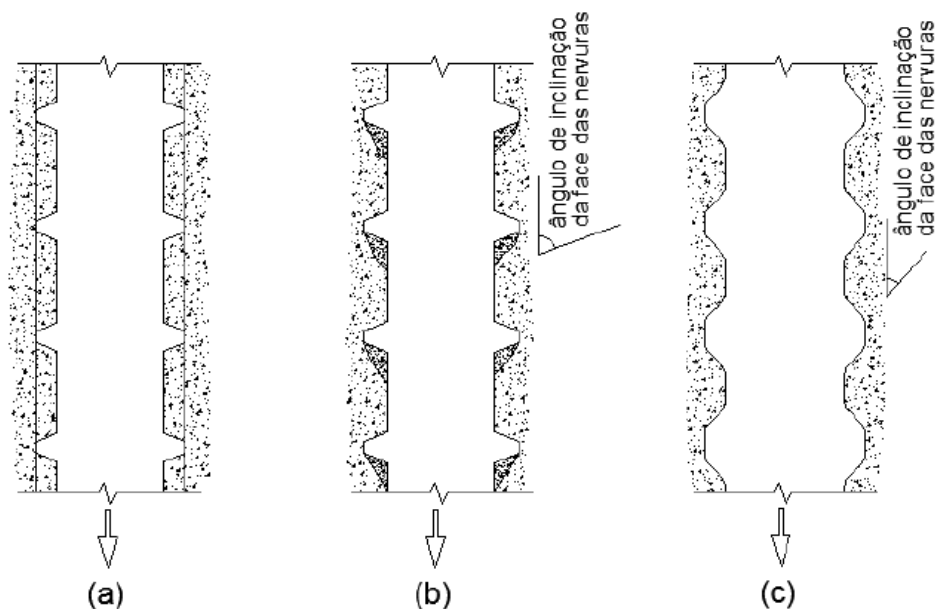
### **Fase III**

Na terceira fase os valores de sollicitação são mais elevados  $\tau > \tau(1 - 3)f_{ct}$ , levando a que a fendilhação longitudinal se espalhe radialmente (perpendicular ao eixo do varão), devido ao



efeito de cunha sofrido no betão esmagado pelas nervuras do varão. A componente externa das tensões é suportada pelas tensões que se envolvem no betão circundante que, como consequência, exerce uma ação de confinamento no varão assegurando as forças de ligação e a rigidez da mesma. Se não existir nenhum tipo de armadura de confinamento (como por exemplo, armadura de esforço transversal), esta fase termina abruptamente assim que a fendilhação atinja a superfície do betão, dando-se o fenómeno de *splitting*. Quando existe armadura de confinamento, a fendilhação demorará mais a atingir a superfície do betão, retardando assim a falha por *splitting* tanto mais quanto maior for a quantidade de armadura de confinamento, uma vez que retardará o prolongamento da fissuração por acção do confinamento, passando-se, então, para a fase IV. É exceção ao anteriormente dito a **Fase IVa**, que ocorre para varões lisos, onde devido à inexistência de nervuras as únicas forças de ligação são as químicas e micromecânicas, sendo que ao atingirem a rotura apenas sobrarão as forças de fricção resultando assim numa falha por *pull-out*.

No caso de ancoragens relativamente longas com confinamento moderado, a falha na ligação aço-betão poderá ocorrer de uma forma “mista”, tendo lugar em algumas zonas da ancoragem por *splitting* e em outras por *pull-out*. Este tipo de rotura encontra-se referido na literatura como *splitting-induced pull-out failure*.



a) rotura por *pull-out*; b) rotura por *pull-out* induzida por *splitting*; c) rotura por *splitting*.

Figura 2.23 – Ilustração das relações entre rotura por *splitting*, por *pull-out* e por *pull-out* induzido por *splitting* (1).

#### **Fase IVb)**

Nesta fase, com confinamento leve a moderado, apesar da fendilhação se espalhar de uma forma rápida e atingir a superfície do betão, a existência de armadura de confinamento assegura a eficiência da ligação, e a falha ocorrerá por *splitting*. Segundo Gambarova (43), após atingido o pico da tensão média de aderência e esta começar a descer, a resistência da ligação permanecerá elevada mesmo a elevados valores de deslizamento.

#### **Fase IVc)**

Na presença de confinamento mais elevado, a rotura da ligação já não acontece pelo fenómeno de *splitting*, mas sim por *pull-out*. Neste caso, é possível atingir valores de tensão de aderência média mais elevados e, tal como na fase anterior, a resistência da ligação permanece significativa para elevados valores de deslizamento. A falha por *pull-out* irá acontecer, uma vez que quando sujeitas a esforços contínuos, as nervuras dos varões irão esmagar o betão entre elas, alisando assim a superfície de contacto entre o varão e o betão, o que levará à diminuição das forças de ligação, resultando no fenómeno de *pull-out*.

Após esta análise, verifica-se que, até à fase III, os fatores mais importantes na robustez da ligação são o tipo de betão e a altura e espaçamento das nervuras dos varões existentes. A existência de armadura de confinamento em maior ou menor quantidade, permite alcançar a fase IV.

No trabalho desenvolvido por Elgehausen (5) foram utilizados betão com resistência à compressão de 30MPa e varões de aço nervurados, para a realização de ensaios em regime monotónico, permitiu concluir que a adesão química suporta valores de tensão de aderência de 0,5 a 1,0 MPa, sendo que se pode considerar a fase perfeita de aderência (fase sem fendimento do betão) até valores de 2 a 3 MPa. A fendilhação longitudinal apresenta-se até valores de pico da resistência da ordem de 2 a 3 MPa, sendo que a fendilhação radial ocorrerá até valores de tensão de aderência entre 10 a 15 MPa. A resistência residual da ligação assumiu valores entre 0,4 a 10 MPa.

# **CAPÍTULO 3**

## **Programa Experimental**



### 3.1 - Introdução

Com base no exposto no capítulo anterior e na sequência do trabalho desenvolvido por Ana Sofia Louro (1), interessa agora conhecer as tensões de aderência mobilizadas na ligação aço-betão quando sujeita a carregamentos monotónicos de compressão. O conhecimento dos esforços aí mobilizados, permitirá melhorar o comportamento das estruturas expostas a atividades sísmicas mais elevadas, assim como tornar mais eficiente a utilização de materiais nesse tipo de estruturas, adequando as características dos materiais existentes no mercado às exigências estruturais.

Assim, apresenta-se neste capítulo os principais pontos que permitem identificar as variáveis em estudo, traça-se os objetivos do programa experimental, descrevem-se os provetes utilizados e as alterações que foram necessárias efetuar, apresenta-se o sistema de ensaio utilizado e especificam-se os ensaios realizados com vista à caracterização do betão e do comportamento da aderência na ligação aço-betão.

### 3.2 - Variáveis de estudo

Ainda que este trabalho se distinga por se focar no regime monotónico de compressão e, em consequência da utilização dos provetes remanescentes do estudo da autora Ana Sofia Louro (1), as variáveis consideradas são as mesmas que as definidas pela mesma, uma vez que se pretende analisar e estudar os fatores que influenciam a prestação de uma ligação viga-pilar ou pilar-fundação, com recurso ao uso de materiais que melhor representam o que é utilizado nas construções em Portugal e na Europa.

Neste contexto, os varões escolhidos são do tipo A500 NR SD de ductilidade especial e possuem nervuras com duas inclinações distintas representando, assim, na perfeição o tipo de armadura correntemente utilizada em zonas com elevado risco de atividade sísmica. Relativamente às dimensões dos varões utilizados, ainda que no Eurocódigo 2 (2) se encontre distinção essencialmente para dimensões superiores e inferiores a 32 mm, foram escolhidos varões com 16 e 25 mm de diâmetro por serem os que melhor representam as dimensões correntemente utilizadas nas zonas de ligação. Relativamente à área relativa das nervuras transversais ( $f_R$ ), como é sabido que esta grandeza assume grande importância para o

desempenho da ligação, foram utilizados varões com menor  $f_R$  (lote A) e varões com maior  $f_R$  (lote B), para que não se analise apenas resultados com o requisito mínimo aceitável pelos documentos normativos.

Relativamente aos tipos de betão escolhidos, e assumindo consciência da importância que esta variável tem no desempenho da ligação, foram selecionadas duas classes de betão com resistências distintas: uma de menor resistência C30/37 (C1) e outra com maior resistência C50/60 (C2). Esta seleção teve, uma vez mais, como grande propósito utilizar betões representativos dos mais utilizados em construções correntes (edifícios habitacionais comuns) e em construções de maior importância (hospitais, viadutos, etc.), respetivamente.

Como anteriormente referido, também a história de carga assume grande relevância no comportamento da ligação aço-betão. Contudo, uma vez que este trabalho incide em ensaios em regime monotónicos, apenas se explorará as consequências da existência de um processo de carga e descarga, sem que ocorra inversão do sentido de aplicação da ação.

Todos os provetes foram executados com um comprimento de aderência curto, o que possibilita a obtenção de tensões de aderência aproximadamente uniformes. Esta opção, adotada no trabalho de Ana Sofia Louro (1) e de Eligehausen (5), permite também uma melhor incorporação dos resultados obtidos em modelos para cálculo automático.

No estudo desenvolvido por Ana Sofia Louro (1), houve a necessidade de submeter alguns varões a um tratamento térmico, uma vez que se pretendia estudar a entrada em cedência do aço e a sua influência no desempenho da ligação. No presente trabalho, tal variável não é relevante, pelo que os provetes com tratamento térmico serão usados para confirmar os resultados obtidos nos provetes similares.

Em suma, o programa experimental desenvolvido envolve as variáveis que assumem maior importância no desempenho da ligação aço-betão:

- varões de aço de ductilidade especial (A500NR SD) com diâmetros de 16 e 25 mm;
- varões com menor e maior área relativa das nervuras transversais (A e B);
- betões com menor e maior resistência à compressão (C1 e C2);
- história de carga através de ensaios monotónicos e monotónicos com descarga.

### **3.3 - Objetivos**

O programa experimental deste trabalho visa um melhor conhecimento da dinâmica interacional entre o betão e o aço em zonas de elevados esforços, sendo que as zonas de ligação viga-pilar e pilar-fundação são os exemplos mais típicos e representativos desta condição.

O presente trabalho consiste na inversão do sentido da força aplicada no estudo de Ana Sofia Louro (1), de forma a avaliar a influência da direção de carregamento nas tensões de aderência. O aprofundamento do estudo desta matéria poderá contribuir para a melhoria da dinâmica estrutural dos edifícios, no que se refere não só aos programas de cálculo, como também a um maior nível de segurança associado a uma utilização mais racional dos materiais, especialmente em construções realizadas em zonas com maior risco de atividade sísmica.

Como cada uma das variáveis anteriormente referidas possui uma contribuição importante na prestação da ligação aço-betão, definiu-se um programa experimental com 30 ensaios de compressão em regime monotónico, de forma a avaliar a influência de cada uma das variáveis e o contributo associado à combinação das mesmas entre si.

### **3.4 - Propriedades dos provetes**

Como já referido, os provetes utilizados no trabalho laboratorial desta tese são os remanescentes do trabalho desenvolvido por Ana Sofia Louro (1). Assim, serão referidos os principais pontos a partir dos quais foram dimensionados os provetes para os seus ensaios, não obstante que se salientem as alterações efetuadas aos mesmos de modo a melhor satisfazer as exigências de um ensaio monotónico à compressão. Este ponto assume particular importância, uma vez que os provetes foram idealizados e dimensionados para cumprir os requisitos de ensaios monotónicos à tração, sendo agora sujeitos à compressão.

#### **3.4.1 - Características dos provetes e materiais usados**

Para dimensionamento dos seus provetes, Ana Sofia Louro (1) partiu do princípio do trabalho projetado por Eligehausen (5), tendo assim como objetivo estudar as condições locais de

aderência a que um varão horizontal numa zona de ligação viga-pilar se encontra sujeito. Assumindo que os ensaios decorrem com controlo de velocidade de carregamento, com incrementos de força monotónica até à rotura, e sabendo da necessidade de utilizar um comprimento de aderência curto, a autora, com uso da Expressão 3.1, e com o conhecimento de que o aço A500NR SD tem tensões de cedência na ordem dos 500 MPa, verificou para um comprimento de aderência de 5d e 6d, qual permitiria nas condições de ensaio atingir a cedência do varão antes da rotura por aderência, concluindo que o valor de 6d seria o mais adequado.

$$\tau_b = \frac{1}{l_b} \times \frac{1}{\pi \times d} \times F_a \quad 3.1$$

em que:

$F_a$  é a força de tração necessária para se dar o arrancamento do varão;

$l_b$  representa o comprimento aderente;

$d$  é o diâmetro do varão utilizado.

De modo a garantir que a rotura ocorresse por *pull-out*, foi necessário assegurar que o betão se encontrasse bem confinado. Assim, para simular uma ligação viga-pilar, foi utilizada uma armadura transversal cujo dimensionamento foi feito com uso da Expressão 2.13, presente no trabalho de Eligehausen (5) e que permite obter uma estimativa da quantidade de armadura transversal necessária.

Tendo, então, disponível o comprimento de amarração necessário, o diâmetro do varão utilizado e a consequente quantidade de armadura transversal, foi possível dimensionar a altura, a largura e o comprimento dos provetes, partindo do princípio de que a zona aderente se deverá localizar no centro do provete e garantido que a massa do provete irá dissipar as tensões desenvolvidas, de forma a não influenciar o estudo da tensão de aderência local. Tem-se, assim, as dimensões do provete, as quais se podem visualizar nas figuras seguintes 3.1 a 3.7.



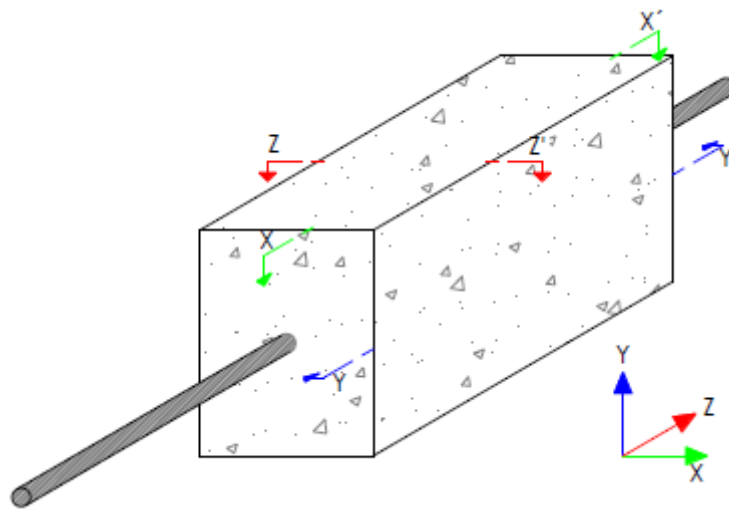


Figura 3.1 - Sistema de coordenadas utilizado para descrever os provetes, retirado de (1).

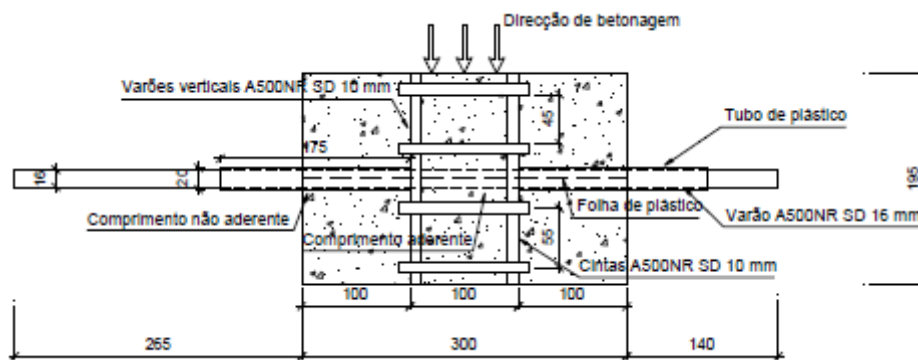


Figura 3.2 - Características dos provetes 16 mm, corte X-X', retirado de (1).

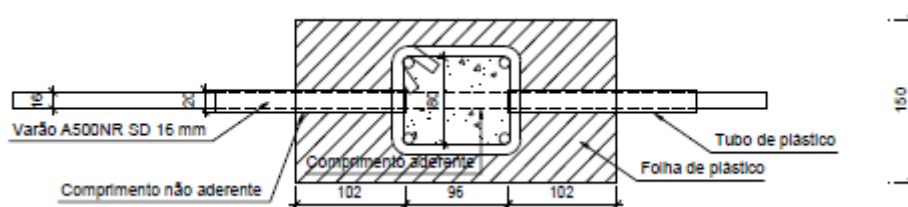


Figura 3.3 - Características dos provetes de 16 mm, corte Y-Y', retirado de (1).

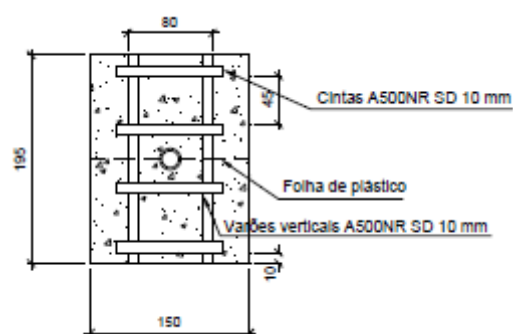


Figura 3.4 - Características dos provetes de 16 mm, corte Z-Z', retirado de (1).

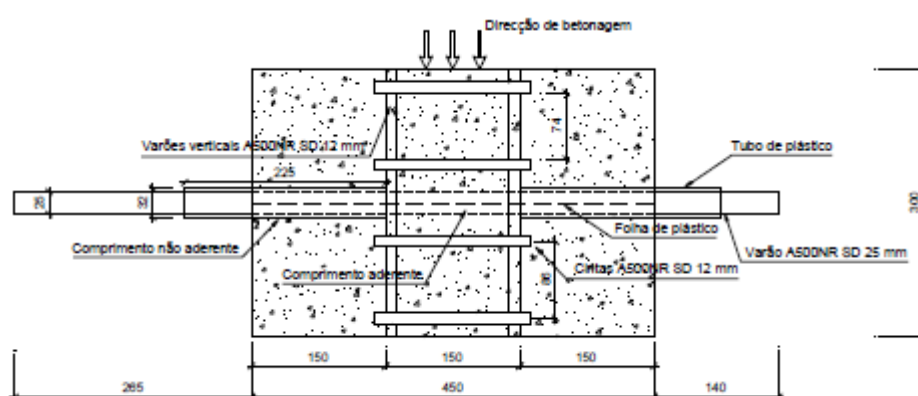


Figura 3.5 - Características dos provetes 25 mm, corte X-X', retirado de (1).

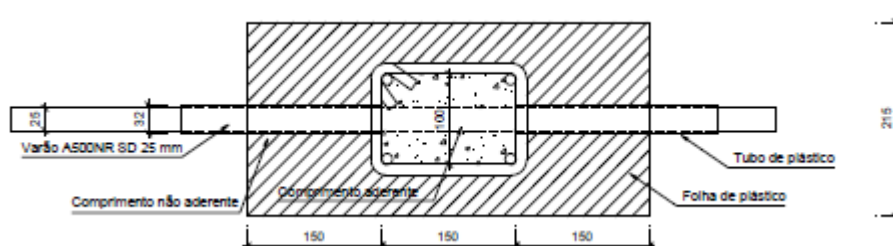


Figura 3.6 - Características dos provetes 25 mm, corte Y-Y', retirado de (1).

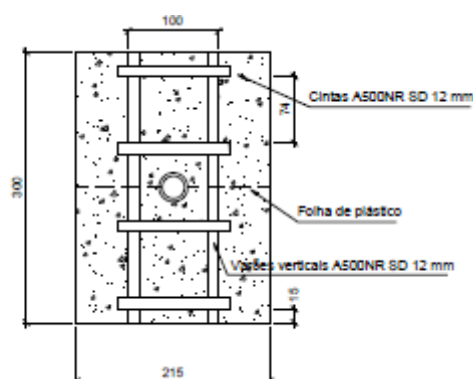


Figura 3.7 - Características dos provetes 25 mm, corte Z-Z', retirado de (1).

Relativamente aos materiais, procedeu-se à caracterização das armaduras em termos mecânicos e de aderência, bem como à avaliação da resistência do betão.

No trabalho desenvolvido por Ana Sofia Louro (1) foi feita a caracterização mecânica das armaduras utilizadas, para que fosse possível apresentar os valores médios para a tensão de cedência ( $R_{eH}$ ), a tensão de rotura ( $R_m$ ), a extensão total na força máxima ( $A_{gt}$ ) e o módulo de elasticidade ( $E$ ), conforme consta do Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Características mecânicas dos varões em estudo, adaptado de (1).

Diâmetro [mm]	$f_R$	$R_{eH}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{gt}$ %	$E$ [GPa]
16	A	544	640	13	137
	AT	517	611	13	194
	B	541	636	13	187
	BT	444	540	14	191
25	A	530	638	10	191
	AT	464	570	12	192
	B	549	662	11	198
	BT	473	578	9	192

Procedeu-se também à caracterização de aderência dos varões em estudo, tendo sido obtidos os valores médios da área relativa das nervuras transversais, representados no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Resistência média dos betões e área relativa das nervuras dos varões.

Diâmetro dos varões	Área relativa das nervuras transversais			
	A	AT	B	BT
$\phi$ 16 mm	0,081	0,080	0,099	0,098
$\phi$ 25 mm	0,096	0,097	0,101	0,101

Em relação ao betão utilizado, foram realizados ensaios de avaliação da sua resistência à compressão e à tração por flexão aos 28 dias, cujos resultados se apresentam no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Resistência do betão à compressão e à tração aos 28 dias.

Classe	Série	$f_{cm, cubo}$	$f_{ctm, fl}$	$f_{ctm}$
		[MPa]	[MPa]	[MPa]
<b>C30/37</b>	1	43,6	3,9	2,6
	3	36,4	3,9	2,6
<b>C50/60</b>	2	59,8	5,4	3,6
	4	63,1	6,8	4,5

Finalmente, salienta-se que para facilitar a identificação dos provetes utilizados foi criada uma designação individual que permite conhecer as propriedades dos materiais utilizados em cada um deles. Desta forma, as designações em causa são: área das nervuras transversais (A ou B), com ou sem tratamento térmico (T para tratamento térmico), betão com menor ou maior resistência (C1 ou C2), diâmetro do varão (16 ou 25mm) e número do provete. Em face das propriedades dos materiais anteriormente referidas e dos resultados que se esperam obter com este estudo, foram escolhidos os provetes que constam no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Provêtes escolhidos para realização dos ensaios e respectivas propriedades.

Propriedades dos Provêtes				Propriedades dos Provêtes			
Área relativa das nervuras	Tipo de betão	Diâmetro do varão	N.º	Área relativa das nervuras	Tipo de betão	Diâmetro do varão	N.º
A	C1	16	10	B	C1	16	10
			11				11
			12				12
A	C2	16	7	B	C2	16	7
			8				8
			9				9
AT	C1	25	10	BT	C1	16	7
			11				8
			12				9
AT	C2	25	10	BT	C1	16	10
			11				11
			12				12
AT	C2	16	10	BT	C1	25	10
			11				11
			12				12

Tendo em atenção que podem existir inúmeros fatores que conduzam a resultados erráticos, foram criados 3 provêtes em tudo idênticos entre si, que aquando da convergência de resultados nos ensaios de aderência, permitirá concluir que não existem condicionantes externas ao provete a influenciar os resultados dos ensaios.

### 3.4.2 - Alterações efetuadas aos provetes

Tendo em conta o objetivo principal deste trabalho, deixa de haver necessidade de garantir a entrada em cedência do varão e surge uma nova variável, a encurvadura do varão. O fenómeno de encurvadura ocorre devido à instabilidade inerente à aplicação de um esforço axial, sem qualquer tipo de carregamento transversal aplicado. Este fenómeno assume particular importância em elementos com um elevado grau de esbelteza associado.

Sendo a encurvadura um fenómeno de instabilidade elástica, o mesmo pode ocorrer sem que o material se aproxime da sua tensão de cedência, dando-se sempre segundo o eixo com o menor momento de inércia associado. Desta forma, a carga crítica para que ocorra encurvadura, pode ser calculada pelo uso da Expressão 3.2.

$$P_{cr} = E \times I \times \left(\frac{\pi}{l_0}\right)^2 \quad 3.2$$

em que:

- $P_{cr}$  é a carga crítica para a qual ocorrerá encurvadura;
- $E$  representa o módulo de elasticidade do material;
- $I$  é, de um modo geral, o menor dos momentos de inércia da secção;
- $l_0$  representa o valor do comprimento de encurvadura.

Considerando que o sistema de amarração da máquina ao segurar o varão funciona como um elemento ou sistema de contraventamento, uma vez que permite estabilidade horizontal da extremidade, conclui-se que o comprimento de encurvadura tem como base um dos 3 modelos presentes na Figura 3.8, que são utilizados para o cálculo de elementos contraventados.

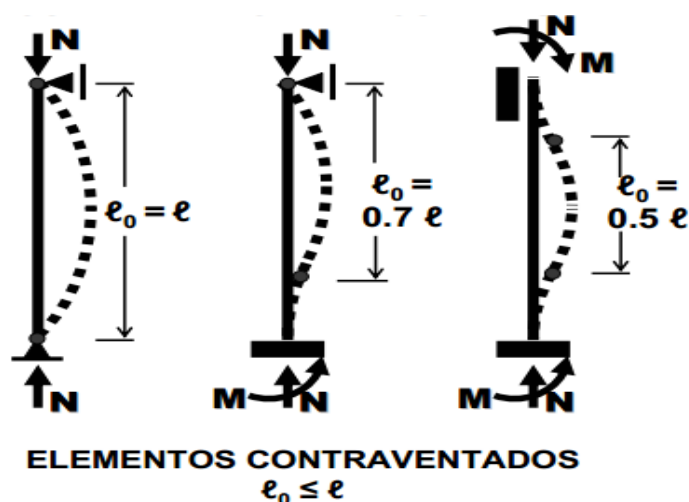


Figura 3.8 – Modelos de encurvadura para elementos contraventados, retirado de (44).

A presença de efeitos desfavoráveis de encurvadura, devido a imperfeições geométricas e desvio da posição de carga, conduz, inevitavelmente, à anulação do ensaio. Esta anulação deve-se ao facto dos valores de tensão de aderência *versus* deslizamento fornecidos pelo sistema de ensaio não serem representativos do fenómeno de aderência de ligação aço-betão, a partir do instante em que ocorre encurvadura do varão.

Em face da possível ocorrência deste fenómeno, foram realizados ensaios exploratórios. Considerando que a encurvadura depende do comprimento linear, das forças envolvidas e da secção transversal, foram escolhidos os provetes de reserva com menor diâmetro (16 mm) e com maior resistência do betão (C2). Assim, os ensaios nos provetes AT\_C2\_16 (10, 11 e 12) permitiram aferir qual o modelo da Figura 3.8 que melhor representa a situação em estudo e também testar todo o sistema de medição de ensaio.

Por outro lado, constatou-se que a existência de um comprimento livre de 207 mm entre a extremidade do sistema de amarração da máquina de ensaio e o início da zona aderente propiciava o fenómeno de encurvadura (ver Figura 3.9).

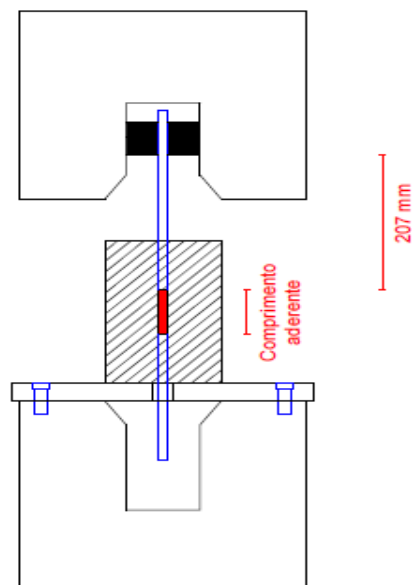


Figura 3.9 - Esquema representativo do sistema de ensaio antes de corte do varão.

Devido ao facto do sistema de ensaio permitir reduzir este comprimento livre (Figura 3.10), optou-se numa primeira fase por se avançar com a realização dos ensaios exploratórios, de forma a se avaliar qual o modelo que melhor representa o comportamento da zona livre, uma vez que as forças envolvidas, teoricamente, não conduziriam à encurvadura do varão.



Figura 3.10 - Foto de ensaio antes das alterações aos provetes, alusiva ao facto de a garra da máquina não poder agarrar o varão mais abaixo, uma vez que o mesmo encosta no cabeçote superior da máquina.



Ou seja, admitindo que o modelo que mais se aproxima da situação em estudo é o modelo com encastramento em ambas as extremidades, uma vez que a garra da máquina não permite rotação numa das extremidades, assim como o comprimento aderente também não o permite na extremidade oposta, considera-se um comprimento de encurvadura  $L_0=0,5L$ , ou seja, 103,5 mm. Para este comprimento e recorrendo à Expressão 3.2, obteve-se uma carga crítica na ordem dos 575 kN.

No entanto, consultando o trabalho realizado pela autora Ana Sofia Louro (1) verificou-se que o valor da tensão de aderência máxima em tração, em regime monotónico e sem entrada em cedência da armadura, ocorreu para o provete AT\_C2\_16\_13 com o valor máximo 26,02 MPa, como é possível verificar na Figura 3.11, retirada do trabalho da autora. Portanto, a esta tensão de aderência corresponde uma força aplicada da ordem dos 125 kN que pode ser obtida através da Expressão 3.3.

$$\tau = \frac{P_{cr}}{\pi \times d \times l_b} \quad 3.3$$

em que:

- $P_{cr}$             representa a carga crítica para a qual ocorrerá encurvadura;
- $d$                 é referente ao diâmetro do varão;
- $l_b$               é o comprimento aderente e assume o valor de  $6d$ .

Provete	$\tau_{0,01}$ (MPa)	$\tau_{0,1}$ (MPa)	$\tau_{1,0}$ (MPa)	$\tau_{d,média}$ (MPa)	$\tau_{d,max.}$ (MPa)
AT_C2_16_3	4,22	11,63	26,02	13,96	26,02

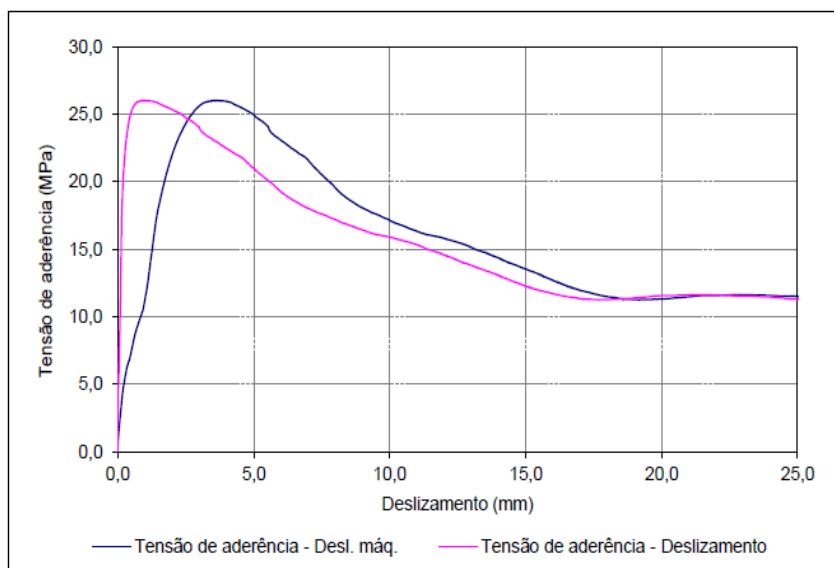


Figura 3.11 - Resultado do ensaio do provete AT\_C2\_16\_3 da autora (1).

Apesar de no caso de esforços de compressão não haver a preocupação com a entrada em cedência da armadura, ainda assim era esperado que fossem atingidos valores superiores aos alcançados na tração, desde que não ocorresse o fenómeno de encurvadura do varão. Tal aumento nos valores de tensão de aderência era de certa forma expectável porque a inversão do sentido da força aplicada conduz a que inicialmente exista uma maior área disponível para mobilizar e dissipar as cargas atuantes (Figura 3.12). Assim, e tendo em conta que entre a carga a impor ( $\pm 125$  kN) e a carga de encurvadura ( $\pm 575$  kN) havia uma diferença considerável, minimizou-se ao máximo o comprimento de encurvadura e procedeu-se à realização dos ensaios exploratórios.

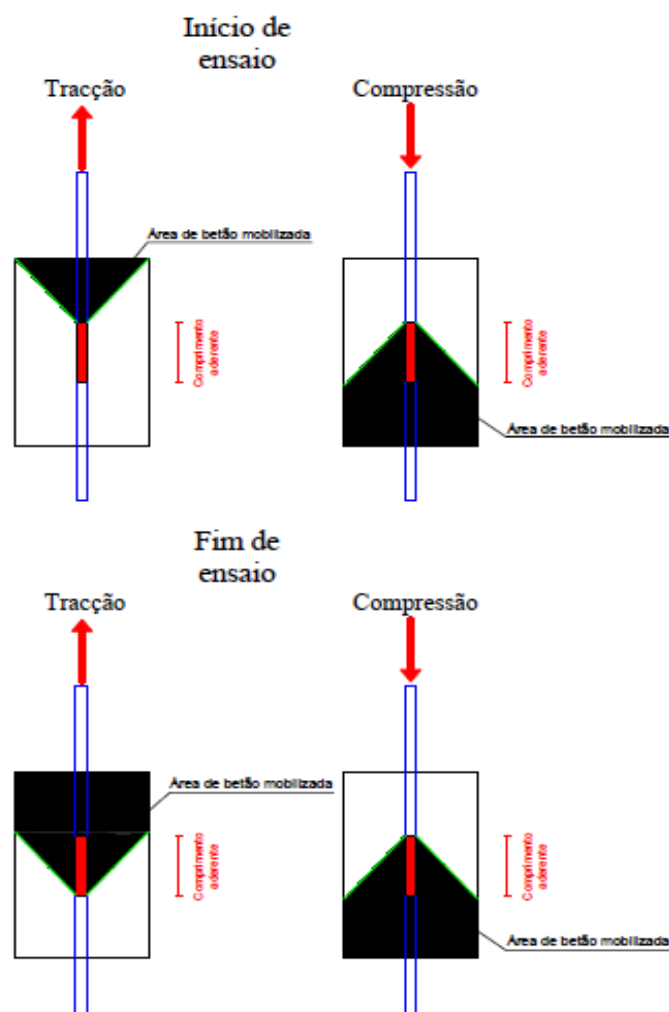


Figura 3.12 - Esquema da área de betão mobilizada nas situações de compressão e de tração.

Na realização dos 3 ensaios dos provetes exploratórios verificou-se que os valores máximos obtidos foram da mesma ordem de grandeza, a rondar os 20 MPa. No entanto, os varões dos provetes AT\_C2\_16\_10 e AT\_C2\_16\_12 encurvaram. Em anexo existem informações mais pormenorizadas dos ensaios com as tensões de aderência obtidas e os gráficos da tensão de aderência *versus* deslizamento destes 3 provetes.

Após análise dos resultados verificou-se que, não só o estudo em causa não se aproxima do modelo proposto ( $L_0=0,5L$ ), como também não se aproxima de nenhum dos 3 modelos contraventados inicialmente propostos.

Uma vez que se obteve encurvadura para dois provetes, com os valores de 20,00 e 19,84 MPa, e não se obteve encurvadura no provete n.º 11 com 20,55 MPa, conclui-se também que estes se encontram no limite do valor da tensão de aderência crítica para que ocorra encurvadura do

varão. Estes resultados aproximam-se mais da situação de elementos não contraventados, com  $L_0 \geq L$ , com um comprimento de encurvadura revelando-se na ordem de  $L_0 = 1,25L$ .

Partindo deste princípio, foi necessário alterar os provetes de modo a tentar minimizar a ocorrência de encurvadura do varão. A análise dos resultados dos provetes exploratórios e dos resultados da autora (1) permite concluir que a envolvente monotónica pode ser definida com um deslizamento da ordem dos 25 mm. Assim, os varões de 16 mm e 25 mm foram cortados o máximo possível, permitindo um valor de escorregamento de 30 mm (incluindo uma margem de 5 mm).

Uma vez que não poderiam ser efetuados processos de corte que induzissem vibrações no varão, correndo o risco de se danificar a ligação no comprimento aderente, optou-se pelo corte do varão com recurso à utilização de corte com solda.

Portanto, com a redução do comprimento de encurvadura foi possível aumentar a carga crítica e desta forma aproveitar os provetes para estudo à compressão (uma vez que as alterações possíveis foram efetuadas não se conhecendo o modelo que melhor se aproxima deste caso de estudo). No Quadro 3.5 apresentam-se os cálculos da carga crítica para os diversos modelos de encurvadura, tendo em conta que foram usados os dados do Quadro 3.6.

A tensão crítica ( $\sigma_{cr}$ ) do Quadro 3.5 representa a tensão máxima que se desenvolve na ligação aço-betão, se não ocorrer a rotura da aderência. Assim:

- se  $\sigma_{cr} < \tau_{d,máx}$  o varão não encurva e o ensaio será considerado válido;
- se  $\sigma_{cr} > \tau_{d,máx}$  ocorre encurvadura do varão e não é possível atingir  $\tau_{d,máx}$ .

Quadro 3.5 - Cálculo da tensão crítica aproximada aos diversos modelos de encurvadura.

AT_C2_16						
Modelo de encurvadura utilizado	Antes de corte do varão			Depois de corte do varão		
$L_0 = 0,5L$	L=	207	mm	L=	187	mm
	$L_0$ =	103,50	mm	$L_0$ =	93,50	mm
	$P_{cr}$ =	575,00	kN	$P_{cr}$ =	704,58	kN
	$\sigma_{cr}$ =	<b>119,16</b>	<b>MPa</b>	$\sigma_{cr}$ =	<b>146,01</b>	<b>MPa</b>
$L_0 = 0,7L$	L=	207	mm	L=	187	mm
	$L_0$ =	144,90	mm	$L_0$ =	130,9	mm
	$P_{cr}$ =	293,37	kN	$P_{cr}$ =	359,48	kN
	$\sigma_{cr}$ =	<b>60,80</b>	<b>MPa</b>	$\sigma_{cr}$ =	<b>74,50</b>	<b>MPa</b>
$L_0 = L$	L=	207	mm	L=	187	mm
	$L_0$ =	207	mm	$L_0$ =	187	mm
	$P_{cr}$ =	143,75	kN	$P_{cr}$ =	176,14	kN
	$\sigma_{cr}$ =	<b>29,79</b>	<b>MPa</b>	$\sigma_{cr}$ =	<b>36,50</b>	<b>MPa</b>

Quadro 3.6 - Valores utilizados no cálculo do Quadro 3.5.

<b>d=</b>	16	mm
<b>E=</b>	194	GPa
<b>I=</b>	3216,99	mm <sup>4</sup>

### 3.5 - Descrição do sistema de ensaio

O sistema de ensaio é constituído por uma máquina servo-controlada, da marca Schenck, com a designação LPM EQ 02, que se encontra calibrada pelo Laboratório de Metrologia de Forças do LNEC e classificada pelo mesmo como um equipamento de classe 0,5, de acordo com a norma EN ISO 7500-1.

A máquina servo-controlada é constituída por um cabeçote superior móvel, um cabeçote inferior estático e um sistema de garras incorporado no cabeçote superior. A utilização deste sistema de garras permite que o varão fique solidário com o cabeçote superior da máquina e, assim, seja aplicada uma força, registando os valores das forças aplicadas e consequentes deslocamentos associados. O referido modelo possui uma capacidade de 1000 kN em regime estático e de 800 kN em regime dinâmico.

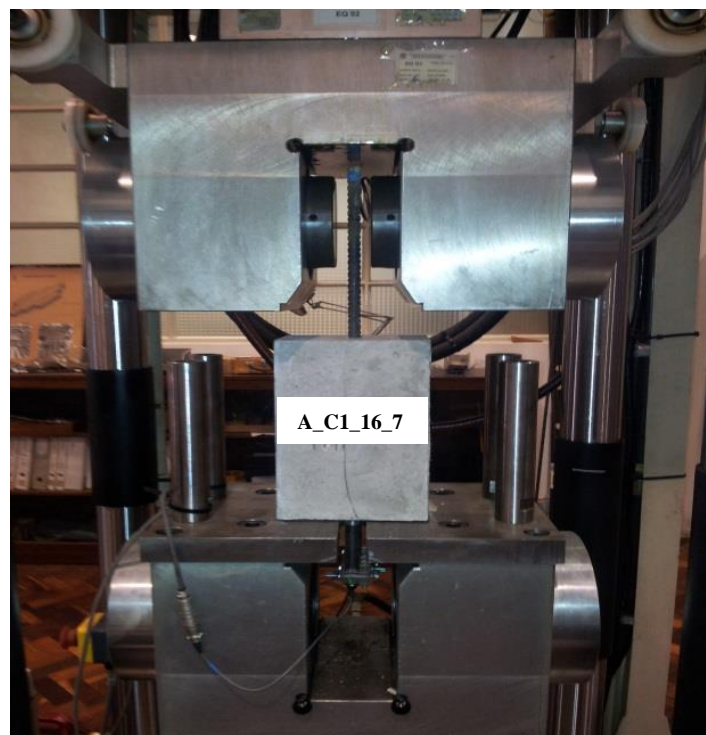


Figura 3.13 – Sistema de ensaio com placa de suporte do provete.

Como é possível verificar na Figura 3.13, surgiu a necessidade de se aplicar um suporte entre o provete e o cabeçote inferior da máquina. Este acessório foi dimensionado e criado pela autora Ana Sofia Louro (1) uma vez que as dimensões do provete não são completamente compatíveis com o cabeçote inferior, não ficando o provete totalmente apoiado e podendo, assim, surgir

tensões que o danificassem. No dimensionamento do suporte, foi necessário ter em atenção a necessidade de existirem aberturas para que a extremidade do varão permanecesse livre e deslizasse sem restrições. O suporte teve também de manter-se completamente solidário com o cabeçote inferior do equipamento de ensaio, assegurando que permanecia indeformável para valores até 500 kN. Assim, este suporte foi feito de um aço designado C45 E Pb, de 4 cm de espessura, como ilustra a Figura 3.14.

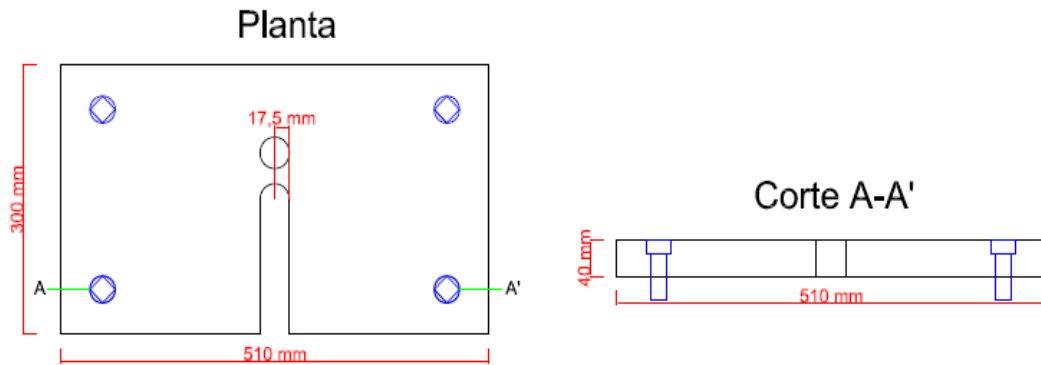


Figura 3.14 - Esquema da placa de suporte dos provetes.

Foi também usada uma membrana plástica entre o provete e o acessório, de forma a regularizar a superfície de contacto entre os dois e evitar possíveis efeitos de extremidade.

Para medir o escorregamento do varão em relação à face inferior do betão, foram utilizados dois transdutores de deslocamento da marca TML, modelo CDP 25 mm. As extremidades de ambos os transdutores de deslocamento encostam diretamente na face do provete, permitindo uma leitura o mais precisa possível. A sua montagem foi efetuada através de dois suportes em acrílico (um para cada diâmetro a ensaiar), que permitem que o transdutor fique solidário à extremidade do varão, registando o deslizamento por este sofrido.

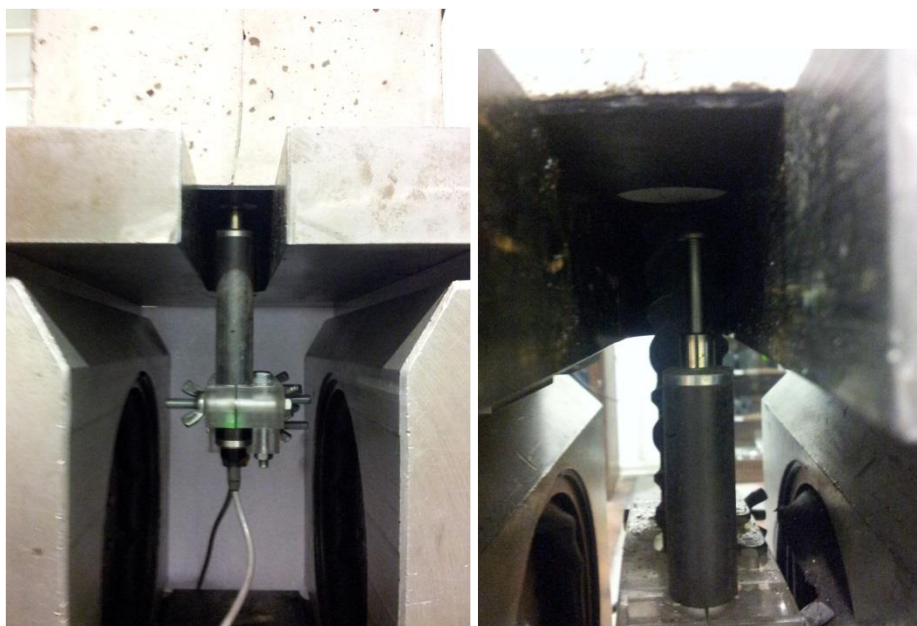


Figura 3.15 - Posição dos CDP's; à esquerda no início do ensaio e à direita no final do ensaio.

Uma vez que estes dados se revelam de grande importância para o trabalho, e que os transdutores de deslocamento já foram utilizados em muitos outros estudos, procedeu-se à calibração dos mesmos, tendo sido efetuadas 5 leituras entre 0 e 25 mm para cada um deles e verificadas as excitações de sinal que constam no Quadro 3.7.

Quadro 3.7 - Calibração dos transdutores de deslocamento para ensaios monotónicos.

CDP 8808		CDP 8811	
Deslocamento imposto	Excitação de sinal	Deslocamento imposto	Excitação de sinal
[mm]	[mV/V]	[mm]	[mV/V]
0	0	0	0
5	1,15872	5	1,18944
10	2,40528	10	2,43888
15	3,65328	15	3,68928
20	4,9008	20	4,93824
25	6,14976	25	6,18576



Para aquisição dos dados relativos à força e ao deslocamento da máquina servo-controlada, bem como dos medidores CDP, foi utilizado o equipamento SPIDER 8, comandado pelo software Catman (com uma frequência de aquisição de 0.5 Hz), que permite o registo e visualização em tempo real dos resultados ao longo do ensaio.

## **3.6 - Campanha de ensaios realizados**

A campanha de ensaios realizada neste trabalho foi executada no Núcleo de Comportamento de Estruturas (NCE) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e tem como principal objetivo caracterizar a aderência aço-betão sujeita a esforços de compressão em regime monotónico. Contudo, para melhor compreensão dos fenómenos envolvidos, efetuaram-se também ensaios de compressão de provetes cúbicos que permaneceram juntos dos provetes para ensaios de aderência, de forma a conhecer a resistência à compressão dos betões no momento dos ensaios de aderência, uma vez que os provetes já têm alguns anos e encontraram-se expostos às condições ambientais.

### **3.6.1 - Ensaios de compressão a betões**

Os provetes cúbicos sujeitos a ensaios de compressão possuem arestas de 150 mm e, a cada conjunto de 3 provetes para ensaio de aderência, encontra-se associado uma série representativa do seu provete cúbico. Assim, os resultados obtidos nos ensaios de compressão, permitem obter uma média representativa da resistência do betão à compressão na data do ensaio. Os resultados desses mesmos ensaios encontram-se no Quadro 3.9.

Apesar de todos os provetes se encontrarem expostos às mesmas condições ambientais, de forma a que as propriedades do betão sejam o mais representativas possível do utilizado no ensaio de aderência, foi ensaiado mais do que um provete cúbico à compressão, sendo assim possível a utilização de uma média dos valores obtidos ( $f_{c,médio}$ ). Na Figura 3.16 apresenta-se o pormenor do ensaio do cubo n.º 13 da série 4.

Quadro 3.8 – Valores de resistência à compressão dos cubos na data de ensaio.

Série	N.º do Cubo	Provetes	$f_{c,cubo}$ [MPa]	$f_{c,médio}$ [MPa]
1	13	A_C1_16	45,00	<b>45,20</b>
	14		45,40	
2	20	A_C2_16	57,10	<b>57,10</b>
3	10	B_C1_16	40,10	<b>39,40</b>
	11	AT_C1_25	39,30	
	12	BT_C1_16	38,80	
	12	BT_C1_25	38,80	
4	13	B_C2_16	67,30	<b>69,80</b>
	14	AT_C2_25	72,20	



Figura 3.16 - Provete cúbico sujeito a ensaio de resistência à compressão.

### 3.6.2 - Ensaios de caracterização da aderência

Os ensaios de caracterização da aderência pretendem simular o comportamento de uma ligação viga-pilar sujeita a esforços de compressão, de forma a compreender as consequências em termos de tensão que ocorrem entre o aço e o betão de aderência.

Depois de definido o objetivo deste trabalho, decidiu-se também realizar um ensaio de compressão com descargas. Ainda que não ocorram inversões no sentido de carregamento, pretende-se determinar se, ao efetuar descarga e novamente compressão, a ligação perderá alguma capacidade significativa de suportar esforços.

Assim, de forma a comparar e realçar o papel das variáveis envolvidas na ligação aço-betão, foi definido o seguinte plano de programa experimental (Quadro 3.9), em que se identificam as variáveis que se pretendem analisar com cada conjunto de ensaios.

Quadro 3.9 - Provetes a comparar e principais parâmetros a analisar.

Provetes			Parâmetros a analisar
A_C1_16	<i>versus</i>	A_C2_16	Resistência do betão
A_C1_16	<i>versus</i>	B_C1_16	Área relativa das nervuras transversais
A_C2_16	<i>versus</i>	AT_C2_25	Diâmetro do varão
A_C2_16	<i>versus</i>	B_C2_16	Área relativa das nervuras transversais
AT_C1_25	<i>versus</i>	BT_C1_25	Efeito das descargas
B_C1_16	<i>versus</i>	B_C2_16	Resistência do betão

Uma vez que os ensaios recorreram a uma imposição de deslocamento, a velocidade de imposição será de extrema importância para este trabalho. É consensual entre vários autores que uma maior velocidade de escorregamento afeta o desempenho da ligação, traduzindo-se em tensões de aderência com valores muito superiores. Segundo o autor (5), embora a envolvente monotónica não sofra alterações, um aumento de velocidade de ensaio na ordem de 100 vezes, traduz-se num aumento da tensão de aderência entre 15 a 20% (Figura 3.17).

Assim, considerou-se a velocidade de ensaio utilizada nos trabalhos experimentais de Ana Sofia Louro (1) e Eligehausen (5), ou seja, de 1.7mm/min. A manutenção desta velocidade foi feita com o intuito de se obterem valores conservativos da tensão de aderência e para que seja possível comparar os resultados obtidos em compressão com os dos ensaios de arrancamento em tração, executados por Ana Sofia Louro (1).

No decorrer dos ensaios, após obtenção de um deslizamento de 25 mm e de toda a informação relevante para o comportamento da ligação, efetuaram-se aumentos na velocidade de deslocamento imposto, o que permitiu verificar visualmente o aumento das tensões de aderência, relatado na literatura da especialidade.

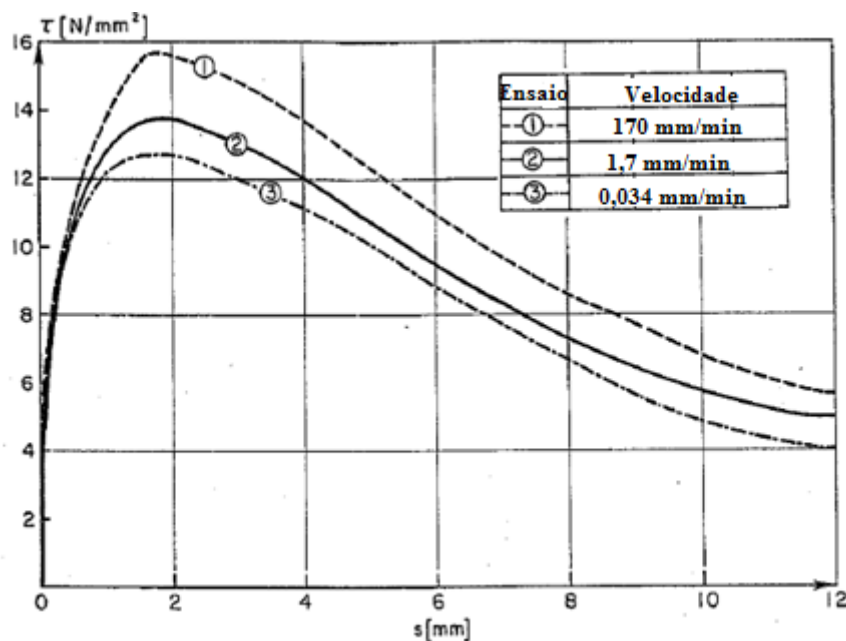


Figura 3.17 - Envolvente monotónica para diferentes velocidades de deslizamento impostas, adaptado de (5).

# **CAPÍTULO 4**

## **Apresentação e Análise dos Resultados Experimentais**



## 4.1 - Introdução

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de caracterização da aderência.

Para tal, numa primeira fase, apresentam-se conforme consta no capítulo 3.6.1, os resultados dos ensaios de compressão do betão que permitem posteriormente ajustar as tensões de aderência obtidas aos valores de referência da resistência do betão à compressão. Seguidamente, a análise recai sobre a comparação dos provetes de cada espécie entre si, para que seja possível analisar, identificar e associar anomalias ocorridas e que não tenham sido identificadas durante a realização dos ensaios, colocando em causa a homogeneidade de resultados entre estes provetes. Por outro lado, também se procedeu a uma análise entre os vários tipos de provetes, de forma a associar comportamentos típicos da influência das variáveis principais envolvidas, tais como o tipo de betão utilizado, o diâmetro dos varões e a área relativa das nervuras transversais.

Posteriormente, é realizada uma análise comparativa entre os resultados obtidos nos ensaios monotónicos à compressão e os ensaios monotónicos à tração obtidos por Ana Sofia Louro (1). Este ponto assume-se também como um dos principais deste trabalho, uma vez que se trata de um tema pouco estudado e que vem no seguimento do trabalho anteriormente citado.

A obtenção de diagramas de tensão de aderência-deslizamento exige a avaliação da resistência do betão à compressão para, posteriormente, ser possível converter as forças e deslocamentos medidos pelo sistema de ensaio em tensões de aderência. Para tal, foram realizados ensaios de avaliação da resistência à compressão na data de realização dos respetivos ensaios de caracterização de aderência.

Desta forma é possível calcular as tensões de aderência que se desenvolvem na ligação no decorrer dos diversos ensaios, recorrendo à expressão:

$$\tau_d = \frac{F_a}{\pi \times d \times l_b} \times \sqrt{\frac{f_{cm}}{f_c}} \quad 4.1$$

em que:

$F_a$  é a força necessária para arrancar o varão;

$d$  representa o diâmetro do varão ensaiado;

$l_b$  refere-se ao comprimento aderente da interface aço-betão;

$f_{cm}$  é a resistência média do betão à compressão;

$f_c$  representa a resistência do betão à compressão na data do ensaio.

Os valores de  $f_{cm}$  adotados seguem o definido por Ana Sofia Louro (1), tendo sido considerado um valor de 45 MPa para provetes de betão C1 e 68 MPa para betão C2. Assim, é possível obter resultados de caracterização da aderência em compressão comparáveis entre si e com os obtidos realizados em tração.

Para se aferir a qualidade dos resultados obtidos procedeu-se também à determinação da tensão de aderência média de cada provete com base no estipulado no Eurocódigo 2 (2). A determinação desta tensão exige a quantificação da tensão de aderência para 0,01 mm, 0,1 mm e 1,0 mm de escorregamento/deslizamento, como se pode avaliar pela expressão seguinte:

$$\tau_{media} = \frac{\tau_{0,01} + \tau_{0,1} + \tau_{1,0}}{3} \quad 4.2$$

em que:

$\tau_{0,01}$  é o valor da tensão de aderência com 0,01 mm de deslizamento;

$\tau_{0,1}$  refere-se à tensão de aderência a 0,1 mm de deslizamento;

$\tau_{1,0}$  representa a tensão de aderência a 1,0 mm de deslizamento.

## **4.2 - Análise dos resultados dos ensaios monotónicos à compressão**

Neste ponto apresentam-se e comentam-se os resultados obtidos em cada conjunto de 3 provetes com as mesmas características. A ordem de análise dos provetes obedece unicamente à ordem cronológica de ensaio. Para tal, apresentam-se graficamente os resultados obtidos nos ensaios individuais, em anexo.



## PROVETES A\_C2\_16

De forma a dar início à bateria de ensaios, foram escolhidos os provetes A\_C2\_16 pelas suas propriedades, com o intuito de clarificar se as alterações efetuadas teriam ajudado a prevenir o fenómeno de encurvadura. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Figura 4.1 e Quadro 4.1.

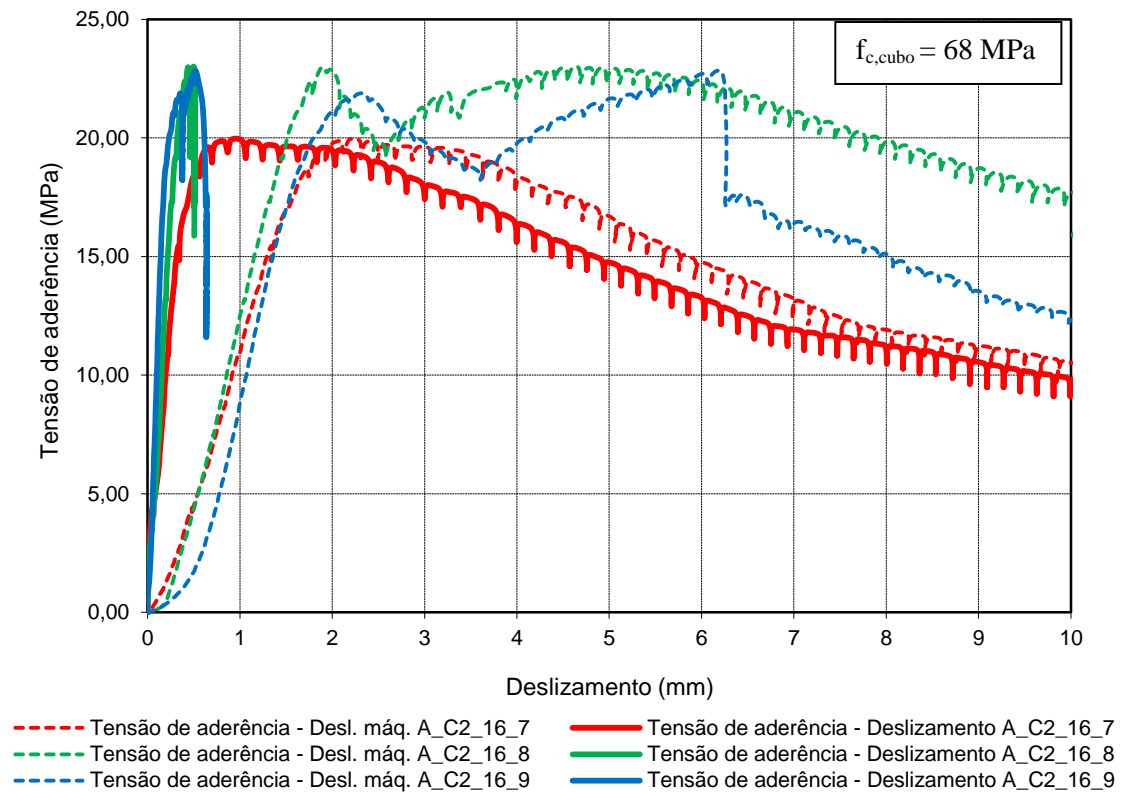


Figura 4.1 - Resultados obtidos nos provetes A\_C2\_16.

Quadro 4.1 - Tensões de aderência obtidas nos provetes A\_C2\_16.

PROVETES	$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{\text{média}}$ [MPa]	$\tau_{\text{máxima}}$ [MPa]
7	2,08	5,39	19,95	9,14	19,97
8	1,31	5,95	encurvou	3,63*	23,01*
9	0,97	9,92	encurvou	5,45*	21,88*
MÉDIA	1,45	7,09	19,95*	6,07*	21,62*

\* valor condicionado pela encurvadura do varão

O provete 7 foi o único dos três ensaiados a não sofrer encurvadura do varão. De notar também que o provete 7 apresenta uma menor rigidez de ligação (traduzida pela inclinação do troço ascendente) sofrendo uma perda repentina dessa rigidez, o que pode estar associado a algum dano sofrido pela ligação antes do ensaio, ou ao ajuste do sistema de amarração no início do mesmo. Caso esse decréscimo de rigidez não se tivesse registado, seria expectável que o provete atingisse valores de tensão de aderência máximos superiores aos registados nos provetes 8 e 9, acabando por ocorrer encurvadura do varão.

Tal como esperado e referenciado na secção 3.3 deste trabalho, aquando da realização dos ensaios exploratórios, o acréscimo de tensão de aderência máximo conseguido, reduzindo o comprimento de encurvadura, não é de 7 MPa (conforme consta do Quadro 3.5). Assim, não foi possível determinar o valor desse aumento, uma vez que o único provete que não encurvou (AT\_C2\_16\_11) registou uma tensão máxima de 20,65 MPa, superior à tensão atingida pelo único provete deste lote.

#### PROVETES A\_C1\_16

Os próximos provetes a serem sujeitos a esforços de compressão foram os provetes A\_C1\_16. Tal como referido anteriormente e, segundo os cálculos efetuados, a experiência adquirida nos 3 provetes exploratórios e no trabalho que antecedeu este estudo, não seria expectável que ocorressem problemas com a encurvadura nestes ensaios, uma vez que o betão possuía uma

resistência mais baixa. Tal facto veio a verificar-se, como se pode constatar pela análise da Figura 4.2, tendo sido obtidos os resultados que constam no Quadro 4.2.

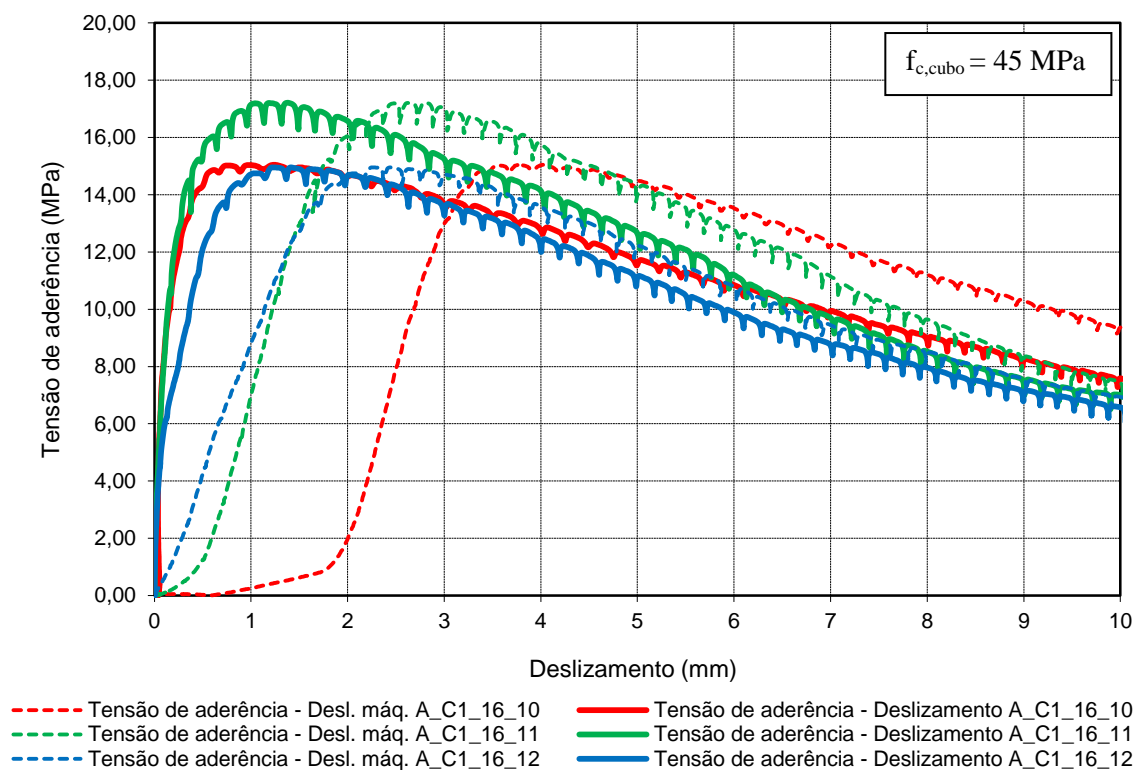


Figura 4.2 - Resultados obtidos nos provetes A\_C1\_16.

Quadro 4.2 - Tensões de aderência obtidas nos provetes A\_C1\_16.

PROVETES	$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{média}$ [MPa]	$\tau_{máxima}$ [MPa]
10	1,85	8,34	15,04	8,41	15,04
11	2,12	8,19	17,13	9,14	17,21
12	1,76	5,79	14,71	7,42	14,95
MÉDIA	1,91	7,44	15,63	8,32	15,73

Os três provetes deste lote respeitam o princípio, de que, quanto mais acentuado for o declive da reta inicial (o que representa uma maior rigidez da ligação), maiores serão as tensões máximas

atingidas, revelando assim um comportamento tipicamente mostrado pelos ensaios de tração já efetuados por diversos autores.

Apesar dos provetes n.º 10 e 12 registarem uma tensão máxima de aderência inferior ao provete n.º 11, na ordem dos 12 a 13%, esta disparidade de resultados é considerada aceitável, tendo sido obtida também no trabalho da autora Ana Sofia Louro (1), face à quantidade de variáveis envolvidas e que influenciam os fenómenos de ligação. Assim, acentua-se não só a necessidade de se executarem três ensaios para cada tipo de provetes, como também de se utilizarem valores médios para cada lote de provetes.

Por sua vez, o provete n.º 10 possui um registo anómalo, como se pode constatar para o movimento tracejado a vermelho na Figura 4.2. Esse registo anómalo refere-se a um deslocamento inicial do cabeçote da máquina, de cerca de 1,8 mm, que não foi acompanhado de registo dos medidores. A análise dos dados recolhidos permite concluir que tal deslizamento não ocorreu devido a problemas de encurvadura ou a qualquer outro fenómeno que invalide a utilização dos resultados deste ensaio. A razão mais plausível para este assentamento prende-se com um escorregamento do varão na zona de amarração do sistema de ensaio. De forma a validar esta hipótese, confirmou-se que, após o deslizamento de cerca de 1,8 mm, o provete teve o comportamento típico dos restantes, uma vez que a rigidez do ramo ascendente é muito semelhante aos provetes n.º 11 e 12.

#### **PROVETES B\_C1\_16**

Os ensaios destes provetes revelaram-se também satisfatórios, não ocorrendo encurvadura para nenhum dos provetes. Contudo, os valores de tensão máxima de aderência registados para os provetes n.º 10, 11 e 12, registados na Figura 4.3 e Quadro 4.3, mostraram-se um pouco baixos para o que seria expectável, em face da maior altura das nervuras transversais.

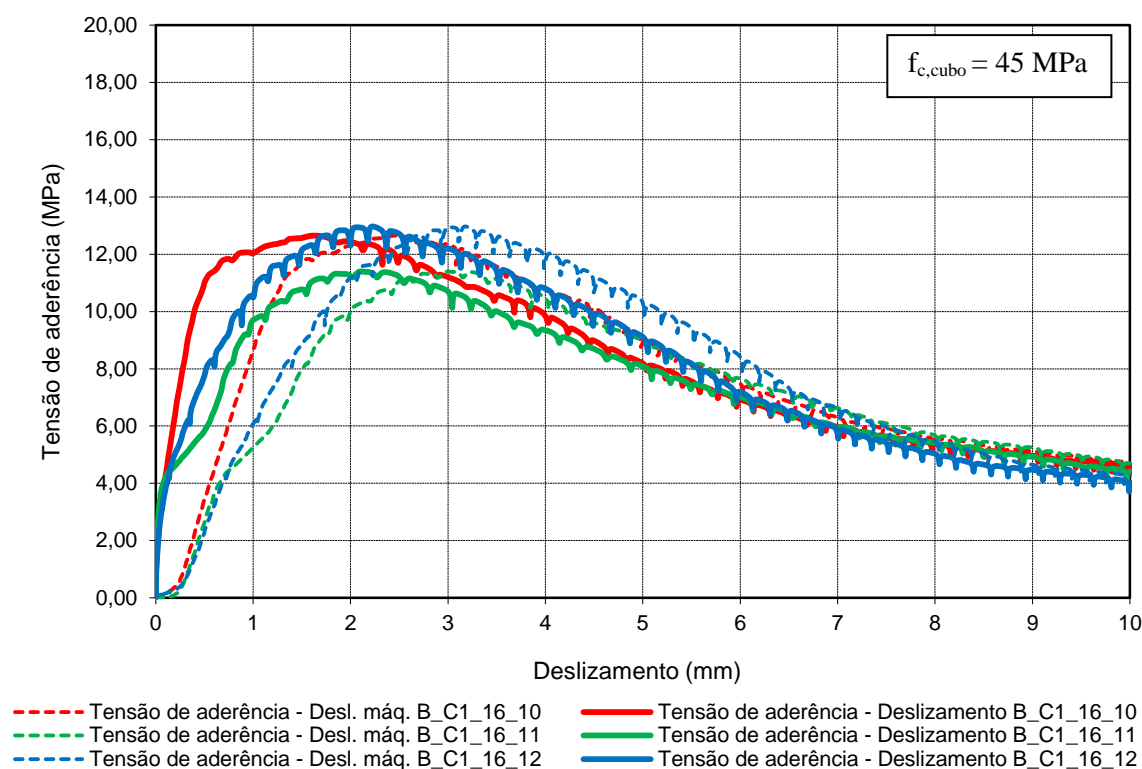


Figura 4.3 - Resultados obtidos nos provetes B\_C1\_16.

Quadro 4.3 - Tensões de aderência obtidas nos provetes B\_C1\_16.

PROVETES	$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{média}$ [MPa]	$\tau_{máxima}$ [MPa]
10	1,39	4,23	12,04	5,89	12,65
11	1,71	4,17	9,67	5,19	11,40
12	1,18	3,77	10,49	5,15	12,97
MÉDIA	1,43	4,06	10,73	5,41	12,34

Neste conjunto de ensaios, o provete n.º 11 registou no ramo ascendente e entre as tensões de aderência de 4 e 6 MPa uma alteração súbita no declive, o que revela uma alteração significativa da rigidez da ligação. Este facto também já tinha ocorrido no provete A\_C2\_16\_7, embora de forma menos acentuada. Portanto, considera-se que o facto deste provete ter atingido o valor de tensão de aderência mais baixo dos 3 pode estar associado a algum dano da zona de ligação do

provete, induzido pela necessidade, antes do início do ensaio, de apertar, desapertar e voltar a apertar o sistema de amarração, para se conseguir um melhor ajuste para o provete.

### PROVETES BT\_C1\_16

O facto de as tensões de aderência registadas nos provetes B\_C1\_16 terem sido mais baixas que o expectável, levou à realização dos ensaios dos provetes BT\_C1\_16 com as mesmas propriedades de influência para ensaios monotónicos de compressão, com o objetivo de se verificar se ocorreria consistência de resultados.

Os ensaios realizados nos provetes n.º 7, 8 e 9 originaram valores ainda mais anómalos que os anteriores, como se pode verificar na Figura 4.4 e Quadro 4.4.

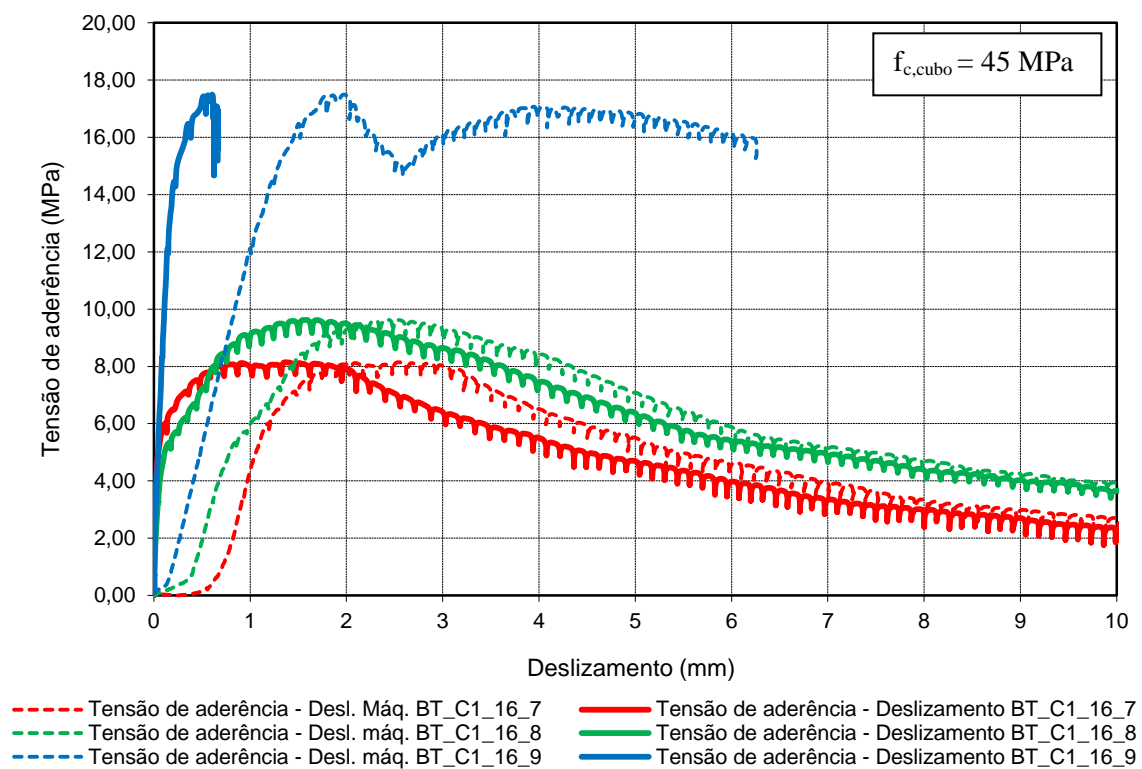


Figura 4.4 - Resultados obtidos nos provetes BT\_C1\_16.

Quadro 4.4 - Tensões de aderência obtidas nos provetes BT\_C1\_16.

<b>PROVETES</b>	<b><math>\tau_{0,01}</math></b> [MPa]	<b><math>\tau_{0,1}</math></b> [MPa]	<b><math>\tau_{1,0}</math></b> [MPa]	<b><math>\tau_{\text{média}}</math></b> [MPa]	<b><math>\tau_{\text{máxima}}</math></b> [MPa]
<b>7</b>	2,47	5,87	7,96	5,44	8,14
<b>8</b>	1,33	4,73	8,97	5,01	9,62
<b>9</b>	1,79	9,34	encurvou	8,77	encurvou
<b>MÉDIA</b>	1,86	6,65	8,47*	5,34	8,88*

\* valor condicionado pela encurvadura do varão

A tensão de aderência para o provete 7 registou um máximo de 8,14 MPa, revelando uma diferença de cerca de 37% para o provete B\_C1\_16\_12. Também o provete n.º 8 teve uma diferença de cerca de 26% para o mesmo provete referenciado, registando uma tensão máxima de 9,62 MPa. Contudo, a tensão de aderência registada no provete n.º 9 não faz qualquer sentido, tendo ocorrido encurvadura do varão para uma tensão máxima de 17,50 MPa.

Em face dos resultados obtidos nos ensaios deste lote, e não havendo outra justificação que não a existência de dano da ligação, foram ensaiados os 3 provetes remanescentes deste lote (n.º 10, 11 e 12) cujos resultados se apresentam na Figura 4.5 e Quadro 4.5.

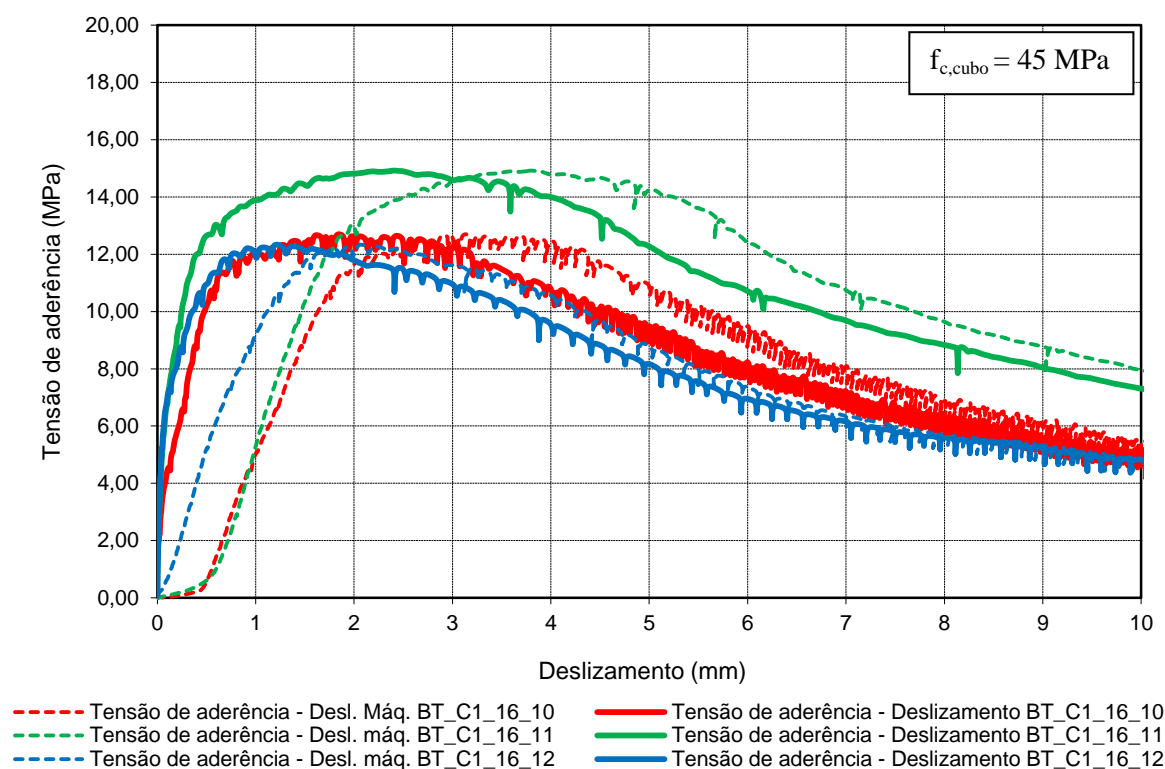


Figura 4.5 - Resultados obtidos no segundo lote dos provetes BT\_C1\_16.

Quadro 4.5 - Tensões de aderência obtidas no segundo lote dos provetes BT\_C1\_16.

PROVETES	$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{média}$ [MPa]	$\tau_{máxima}$ [MPa]
10	1,82	4,29	12,03	6,05	12,70
11	2,07	6,76	13,88	7,57	14,92
12	1,97	6,91	11,95	6,94	12,34
<b>MÉDIA</b>	1,95	5,99	12,62	6,85	13,32

\* valor condicionado pela encurvadura do varão

Os resultados agora obtidos revelaram consistência com os resultados obtidos nos provetes B\_C1\_16, como esperado desde início. Os provetes n.º 10 e 12 registraram valores bastante próximos dos valores dos provetes B\_C1\_16, tendo o provete n.º 10 atingido 12,70 MPa e o



proвете n.º 12 registado 12,34 MPa de tensão de aderência máxima. É também de salientar que os valores médios da tensão de aderência máxima registados por estes provetes se revelaram ligeiramente superiores aos do lote B\_C1\_16, na ordem de 1,4 MPa.

## PROVETES AT\_C1\_25

Neste conjunto de provetes, em face do maior diâmetro e da resistência do betão não se verificaram fenómenos de encurvadura do varão como é verificável na Figura 4.6, tendo sido obtidos os resultados que constam no Quadro 4.6.

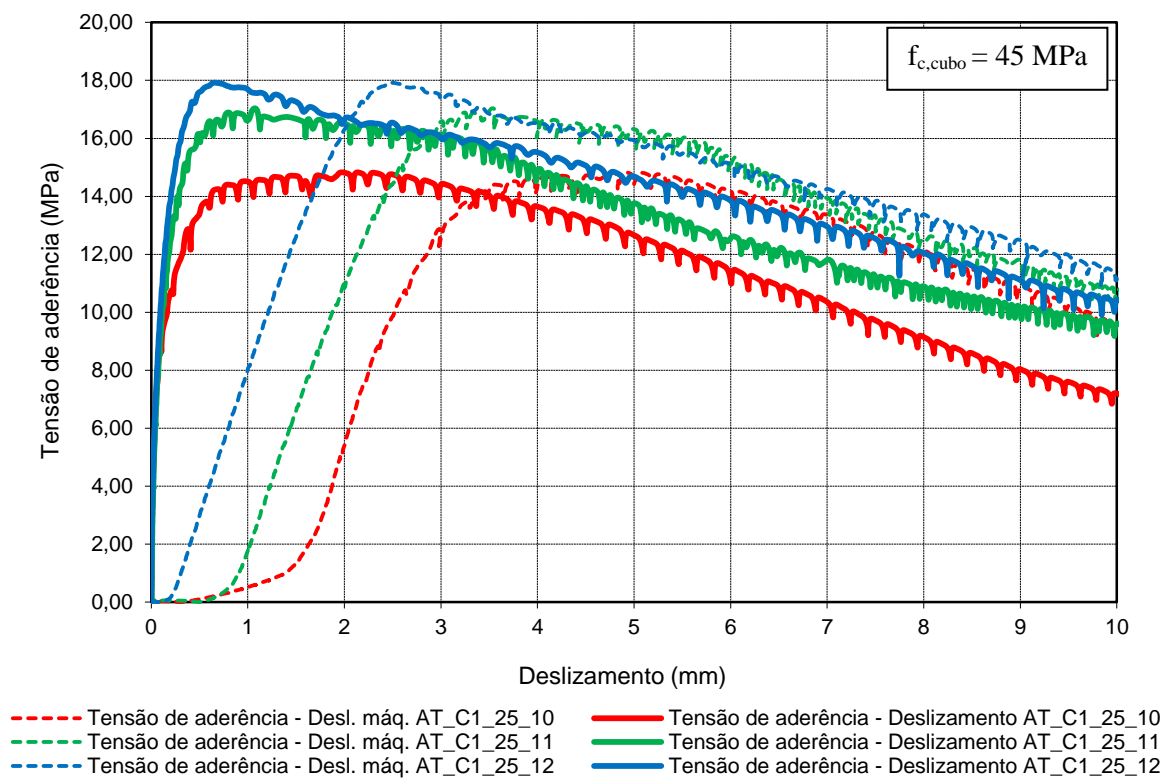


Figura 4.6 - Resultados obtidos nos provetes AT\_C1\_25.

Quadro 4.6 - Tensões de aderência obtidas nos provetes AT\_C1\_25.

PROVETES	$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{\text{média}}$ [MPa]	$\tau_{\text{máxima}}$ [MPa]
10	2,86	8,79	14,52	8,72	14,83
11	2,29	9,28	16,62	9,40	17,03
12	3,51	10,31	17,70	10,51	17,92
MÉDIA	2,89	9,46	16,28	9,54	16,59

A análise da relação tensão de aderência *versus* deslizamento permite concluir que os 3 provetes revelam um comportamento inicial muito idêntico, ainda que o provete n.º 10 sofra uma perda de rigidez da ligação um pouco prematura (por volta dos 8,50 MPa de tensão de aderência). Essa perda de rigidez da ligação origina uma tensão de aderência máxima cerca de 17% inferior aos outros dois provetes. Apesar da diferença de resultados, o gráfico não revela que o resultado obtido possa estar relacionado com algum fator externo ao grande número de variáveis envolvidas no fenómeno de ligação aço-betão.

Salienta-se também que os resultados obtidos nos provetes n.º 11 e 12 são muito semelhantes ao longo de todo o ensaio, registando-se também tensões de aderência máxima muito próximas.

#### PROVETES AT\_C2\_25

Tal como esperado, após os ensaios exploratórios com os provetes AT\_C2\_16 e ainda que o aumento do diâmetro do varão pudesse levar a uma diminuição da tensão de aderência máxima, as forças envolvidas conduziram à encurvadura do varão nos 3 provetes deste conjunto. Os resultados obtidos, apesar de não se referirem a tensões de aderência, apresentam-se na Figura 4.7 e Quadro 4.7.

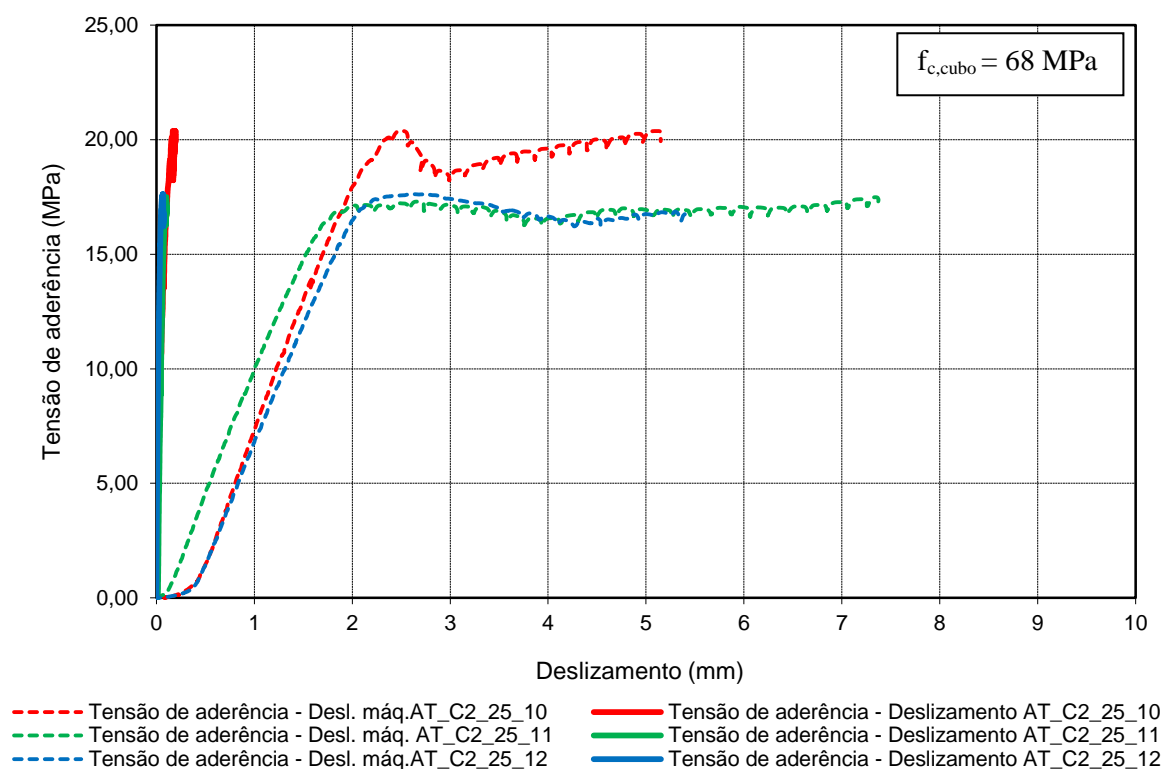


Figura 4.7 - Resultados obtidos nos provetes AT\_C2\_25.

Quadro 4.7 - Tensões de aderência obtidas nos provetes AT\_C2\_25.

PROVETES	$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{média}$ [MPa]	$\tau_{máxima}$ [MPa]
10	4,22	16,64	encurvou	10,43*	20,39*
11	0,08	encurvou	encurvou	0,08*	17,49*
12	7,48	encurvou	encurvou	7,48*	17,62*
MÉDIA	3,93	16,64*	---	5,26*	18,49*

\* valor condicionado pela encurvadura do varão

Apesar de não ser possível concluir além dos valores onde se registou a encurvadura dos varões, os provetes n.º 11 e 12 registaram comportamentos muito semelhantes, tendo atingindo uma tensão de encurvadura também muito próxima. O facto de se encontrar um pequeno

deslizamento no início do andamento do gráfico inerente ao provete n.º 11, revela apenas um assentamento inicial do provete, não sendo em nada condicionante para os dados registados.

### PROVETES BT\_C1\_25

Este conjunto de provetes foi sujeito a ensaios com 3 descargas (onde nunca ocorreu inversão do sentido da carga). Assim, foram obtidos os registos dos ciclos conforme se pode visualizar na Figura 4.8. Estes ensaios permitem avaliar o impacto das perdas de força na envolvente monotónica da relação tensão de aderência-deslizamento.

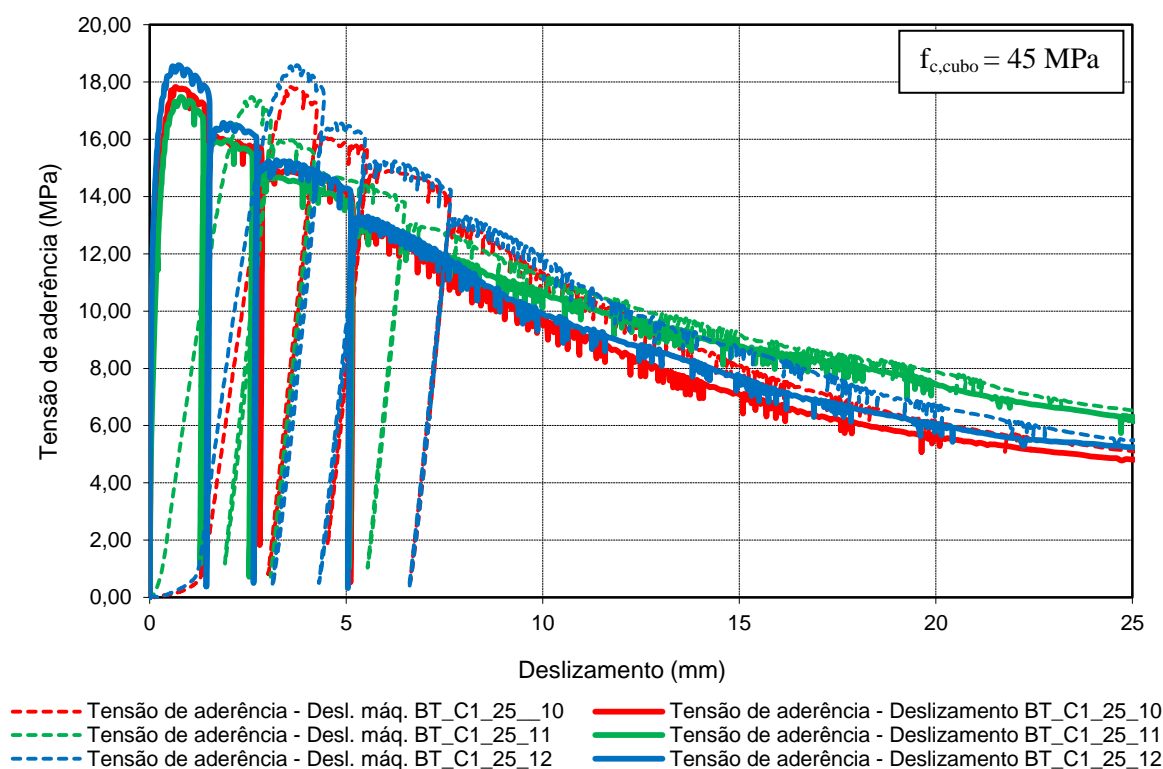


Figura 4.8 - Resultados obtidos nos provetes BT\_C1\_25.

No conjunto de ensaios deste lote é de realçar que, não só não ocorreu encurvadura do varão em nenhum dos provetes, como também todos os resultados obtidos apresentam uma enorme consistência, evidenciando que todos os ensaios decorreram em condições ótimas. Os resultados obtidos neste conjunto de ensaios apresentam-se no Quadro 4.8.

Quadro 4.8 - Tensão de aderência nos vários ciclos do ensaio com descarga.

Provetes N.º	Tensão de aderência máxima			Tensão de aderência por atrito
	1º Ciclo [MPa]	2º Ciclo [MPa]	3º Ciclo [MPa]	
<b>10</b>	17,83	16,14	14,90	7,13
<b>11</b>	17,48	15,96	14,63	6,99
<b>12</b>	18,59	16,45	15,27	7,44
<b>MÉDIA</b>	17,97	16,18	14,93	7,19

#### PROVETES B\_C2\_16

Neste conjunto de provetes, em face da maior altura das nervuras, o varão encurvou. No entanto, apesar deste fenómeno ter ocorrido é possível comparar o comportamento da ligação, até ao momento da encurvadura do varão.

Os resultados obtidos, 21,68, 20,52 e 21,16 MPa respetivamente para os provetes n.º 7, 8 e 9, registados no Quadro 4.9, não representam a tensão máxima de aderência na medida em que a ligação não foi mobilizada ao limite, uma vez que a encurvadura do varão ocorreu primeiro, como representa a Figura 4.9. Ainda assim, os resultados obtidos são consistentes com os dos provetes do lote A.

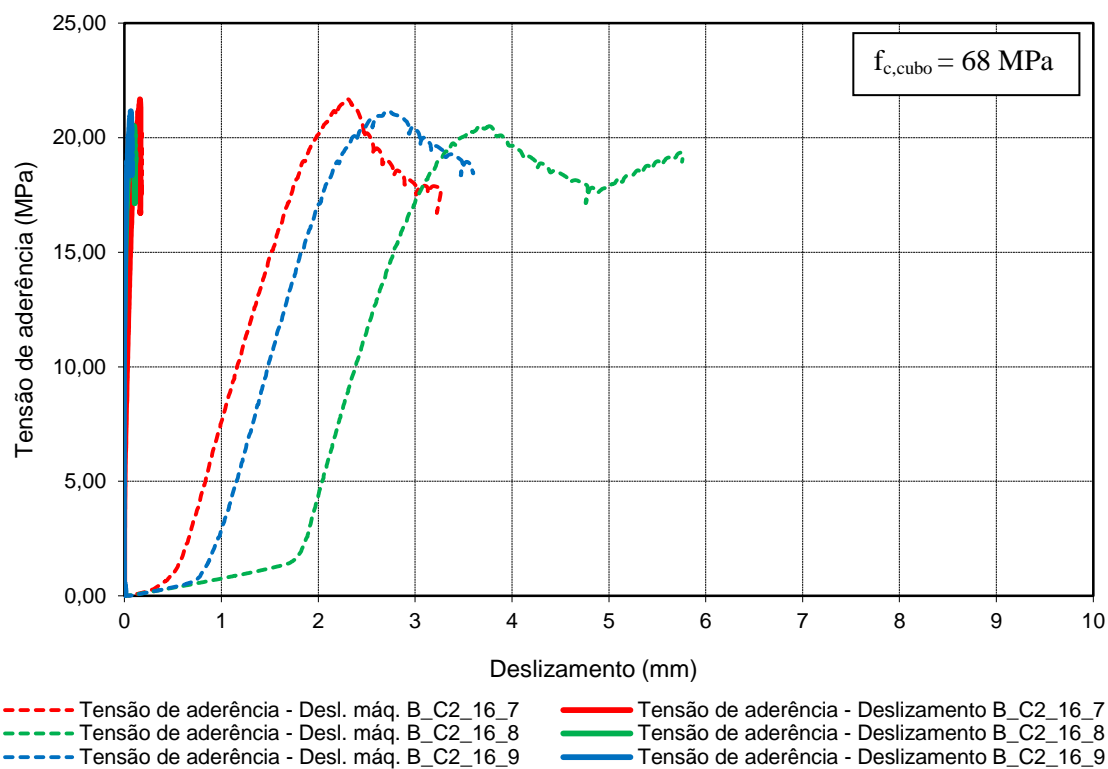


Figura 4.9 - Resultados obtidos nos provetes B\_C2\_16.

Quadro 4.9 - Tensões de aderência obtidas nos provetes B\_C2\_16.

PROVETES	$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{média}$ [MPa]	$\tau_{máxima}$ [MPa]
7	7,09	18,98	encurvou	13,04*	21,68*
8	14,79	20,49	encurvou	17,64*	20,52*
9	16,07	encurvou	encurvou	16,07*	21,16*
MÉDIA	12,65	19,74*	---	15,58*	21,12*

\* valor condicionado pela encurvadura do varão

#### **4.2.1 - Influência das diferentes variáveis envolvidas**

A análise dos resultados obtidos com vista à caracterização da influência das diferentes variáveis envolvidas no comportamento da ligação exige a comparação dos resultados obtidos para as tensões de aderência média ( $\tau_{d, \text{méd}}$ ), máxima ( $\tau_{d, \text{máx}}$ ) e de atrito ( $\tau_{d, \text{atrito}}$ ).

Segundo o que consta no Model Code (27), a tensão de atrito ( $\tau_{d, \text{atrito}}$ ) corresponde a cerca de 40% da tensão de aderência máxima obtida, e será utilizada neste trabalho como referência para uma melhor percepção e comparação dos resultados obtidos.

#### **PROVETES A\_C1\_16 *VERSUS* PROVETES B\_C1\_16**

A comparação dos resultados obtidos nestes 2 conjuntos permite avaliar a influência da área relativa das nervuras transversais dos varões, quando sujeitos a esforços de compressão monotónicos.

Em face do conhecimento adquirido na pesquisa bibliográfica deste trabalho, era esperado que o lote de provetes com maior área relativa das nervuras transversais (B) obtivesse um comportamento mais rígido da ligação e, consequentemente, atingisse valores de tensão de aderência mais elevados. O trabalho desenvolvido por Ana Sofia Louro (1) revelou que entre os lotes A e B existe um acréscimo da tensão de aderência máxima da ordem dos 15%. Esse é o comportamento típico em ensaios de tração e, ainda que ocorresse uma variação na diferença registada, também era esperado um aumento das tensões de aderência com o aumento da área relativa das nervuras transversais, para ensaios de arrancamento em compressão.

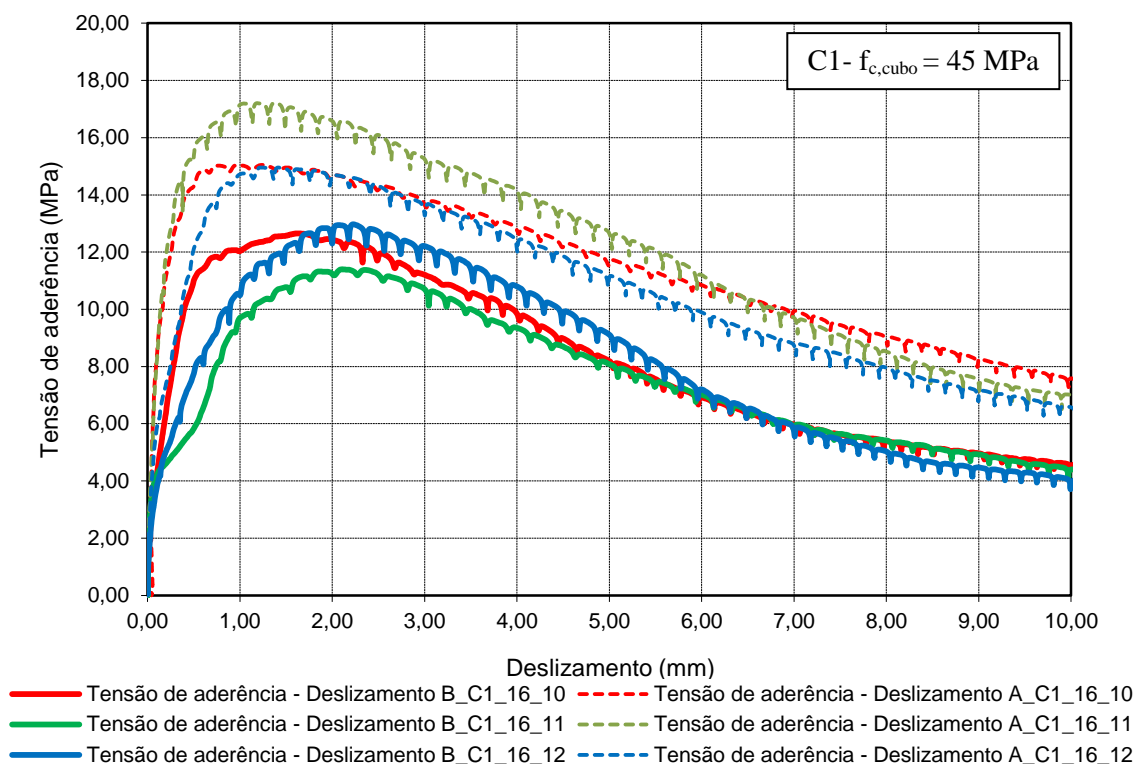


Figura 4.10 - Análise comparativa dos resultados obtidos nos provetes A\_C1\_16 e B\_C1\_16.

Quadro 4.10 - Valores médios dos resultados obtidos nos provetes A\_C1\_16 e B\_C1\_16.

PROVETES	A_C1_16				PROVETES	B_C1_16		
	$\tau_{d,max}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,atrito}$ [MPa]			$\tau_{d,max}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,atrito}$ [MPa]
<b>10</b>	15,04	8,41	6,02		<b>10</b>	12,65	5,89	5,06
<b>11</b>	17,21	9,14	6,88		<b>11</b>	11,40	5,19	4,56
<b>12</b>	14,95	7,42	5,98		<b>12</b>	12,97	5,15	5,19
<b>MÉDIA</b>	15,73	8,32	6,29		<b>MÉDIA</b>	12,34	5,41	4,94

Os provetes do lote A\_C1\_16 ( $f_R=0,081$ ) mostraram, de uma forma geral, possuir uma ligação mais rígida e, conseqüentemente, valores de tensão de aderência mais elevados que os provetes B\_C1\_16 ( $f_R=0,099$ ), revelando uma diferença na média dos 3 provetes de cerca de 22%.

Dado que os resultados obtidos se afastavam do esperado, foram feitos ensaios adicionais em provetes com as mesmas características: os provetes BT\_C1\_16 ( $f_R=0,098$ ). Nestes ensaios, os



resultados obtidos são consistentes com os anteriores. Portanto, aparentemente nos ensaios de arrancamento em compressão, uma maior área relativa das nervuras transversais das armaduras não é sinónimo de uma maior tensão máxima de aderência.

### PROVETES B\_C2\_16 *VERSUS* PROVETES A\_C2\_16

Em face dos resultados anteriormente referidos, analisa-se agora se a influência das nervuras é a mesma nos betões de resistência mais elevada e nos betões de menor resistência.

Os resultados destes 2 conjuntos de provetes apresentam-se na Figura 4.11 e no Quadro 4.11. Os mesmos permitem concluir que, contrariamente ao que se registou em betões de menor resistência, a maior área relativa das nervuras transversais conduziu a resultados similares aos obtidos nos ensaios com arrancamento em tração.

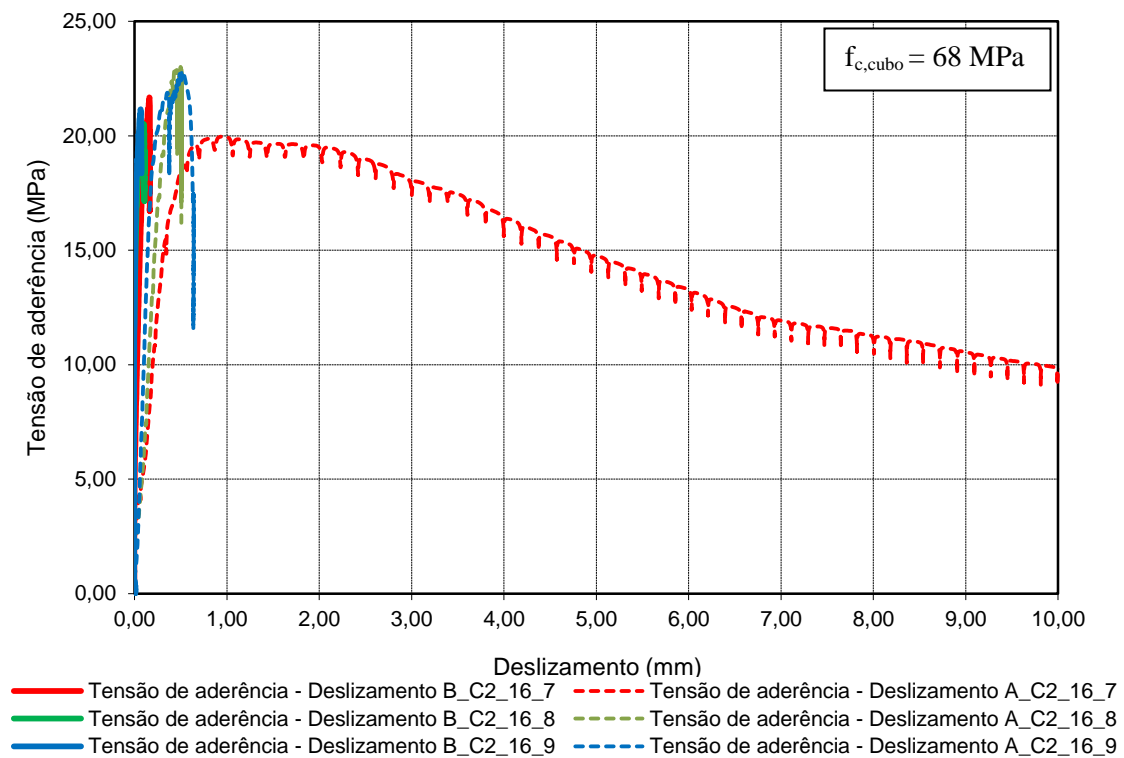


Figura 4.11 - Análise comparativa dos resultados obtidos nos provetes A\_C2\_16 e B\_C2\_16.

Quadro 4.11 - Valores médios dos resultados obtidos nos provetes A\_C2\_16 e B\_C2\_16.

B_C2_16				A_C2_16			
PROVETES	$\tau_{d,max}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,atrito}$ [MPa]	PROVETES	$\tau_{d,max}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,atrito}$ [MPa]
7	21,68*	encurvou		7	19,97	9,14	7,99
8	20,52*	encurvou		8	23,01*	encurvou	
9	21,16*	encurvou		9	21,88*	encurvou	
MÉDIA	21,12*	---		MÉDIA	21,62	---	

\* valor condicionado pela encurvadura do varão

Ou seja, nestes ensaios é bem notório que os varões com maior área relativa das nervuras transversais possuem uma ligação mais rígida, motivo esse que conduziu a que não fosse possível atingir a tensão de aderência máxima. Realça-se ainda que a diferença de rigidez do ramo ascendente não seria tão notória se o comportamento do provete A\_C2\_16\_7 fosse semelhante aos restantes do seu lote.

#### PROVETES A\_C1\_16 VERSUS PROVETES A\_C2\_16

Apesar de ter ocorrido a encurvadura dos varões nos provetes com betão de resistência mais elevada, estes ensaios permitem avaliar a influência do tipo de betão no comportamento do ramo ascendente da relação tensão de aderência-deslizamento.

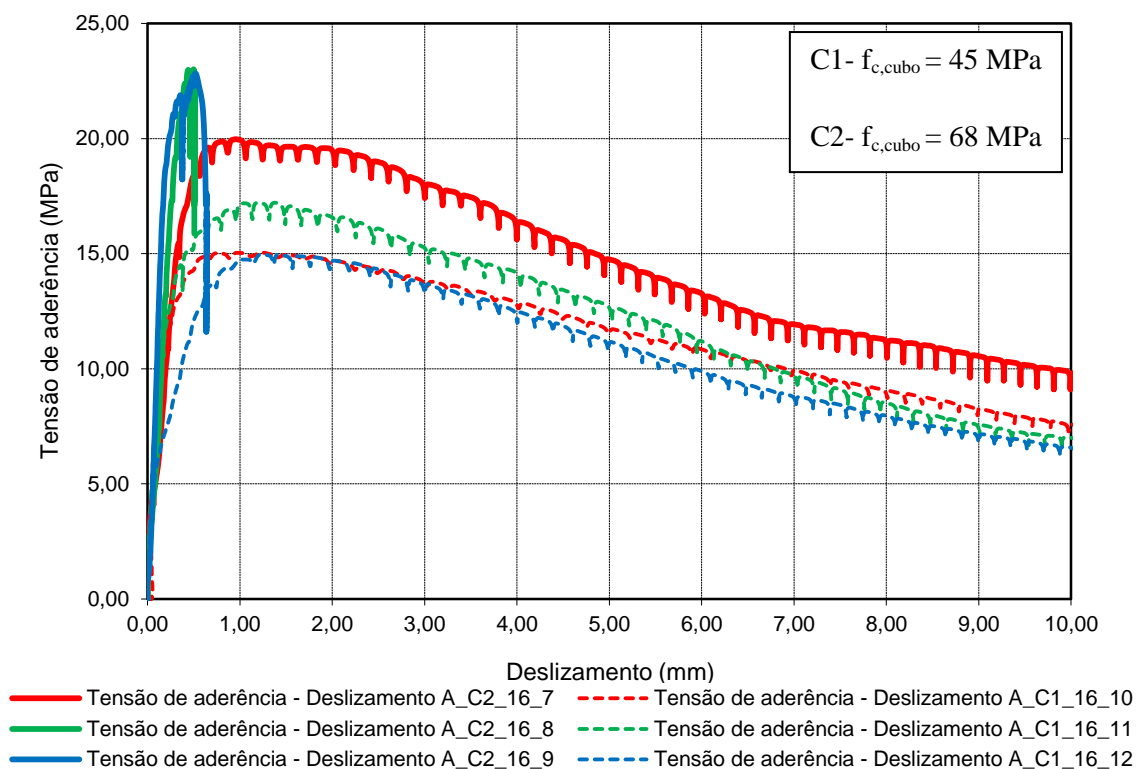


Figura 4.12 - Análise comparativa dos resultados obtidos nos provetes A\_C2\_16 e A\_C1\_16.

Quadro 4.12 - Valores médios dos resultados obtidos nos provetes A\_C2\_16 e A\_C1\_16.

PROVETES	A_C1_16				PROVETES	A_C2_16		
	$\tau_{d,max}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,atrito}$ [MPa]			$\tau_{d,max}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,atrito}$ [MPa]
<b>10</b>	15,04	8,41	6,02		<b>7</b>	19,97	9,14	7,99
<b>11</b>	17,21	9,14	6,88		<b>8</b>	23,01*	encurvou	
<b>12</b>	14,95	7,42	5,98		<b>9</b>	21,88*	encurvou	
<b>MÉDIA</b>	15,73	8,32	6,29		<b>MÉDIA</b>	21,62*	---	

\* valor condicionado pela encurvadura do varão

Pela análise do gráfico da Figura 4.12 é possível verificar que, até perto do valor de 5 MPa de tensão de aderência, o comportamento obtido pelos provetes é muito idêntico, notando-se apenas a partir desse valor uma maior rigidez da ligação nos provetes com betão de mais elevada resistência, permitindo assim obter valores mais elevados para a tensão de aderência, o

que conduziu a que não tenha sido possível atingir a tensão de aderência máxima (tendo a encurvadura do varão ocorrido primeiro).

Como já anteriormente referenciado, o provete n.º 7 do lote A\_C2\_16 foi o único em que o varão não encurvou, muito possivelmente devido à perda de rigidez que se registou no troço ascendente. Esta perda de rigidez conduz à diminuição da média da tensão de aderência máxima registada pelos 3 provetes, o que indica que os varões destes provetes encurvaram para valores de tensão na ordem dos 22 MPa, ou seja, para valores 38% superiores à tensão registada nos provetes com betão de menor resistência. Tal deixa antever que o aumento da resistência do betão ainda poderia ter um efeito mais significativo se tivesse sido atingida a tensão de aderência máxima da ligação.

Assim, conclui-se que o aumento da resistência do betão conduz a um aumento significativo nos valores da tensão de aderência.

#### **PROVETES B\_C2\_16 *VERSUS* PROVETES B\_C1\_16**

Sabendo que a resistência à compressão do betão se revelou importante nos ensaios com varões com menor área relativa das nervuras transversais, comparam-se agora os resultados obtidos para ambos os betões nos provetes com maior área relativa das nervuras transversais (Figura 4.13 e Quadro 4.13).

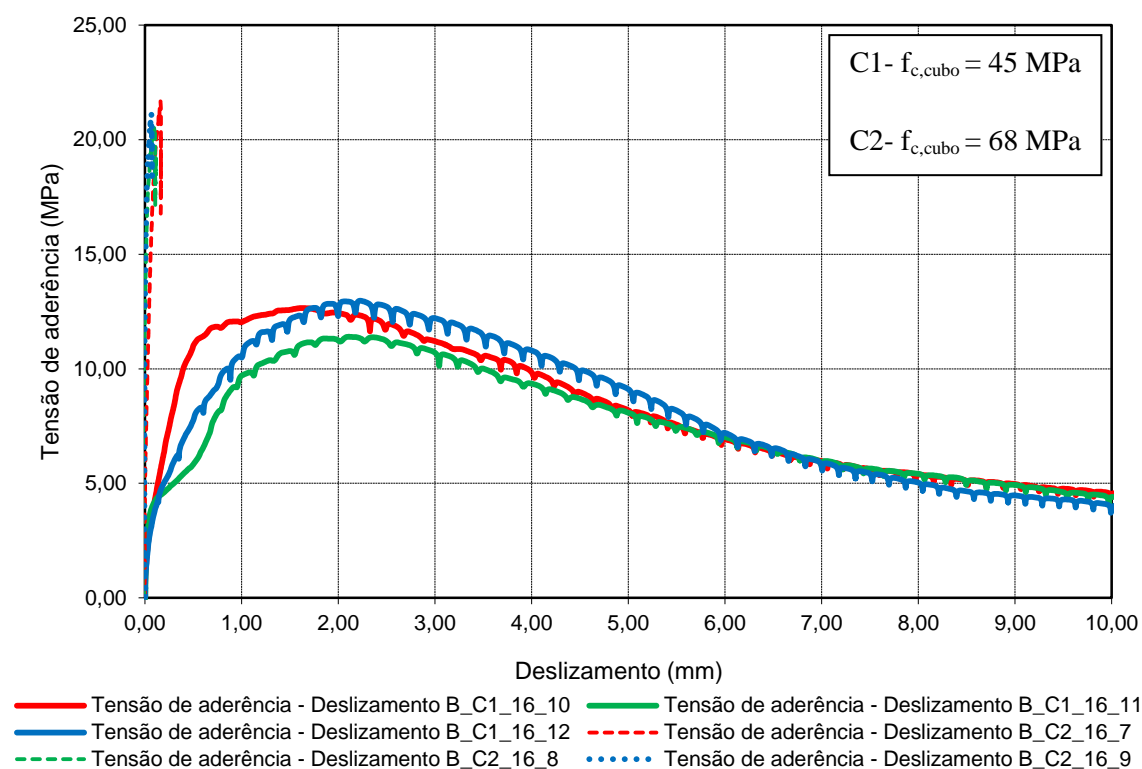


Figura 4.13 - Análise comparativa dos resultados obtidos nos provetes B\_C1\_16 e B\_C2\_16.

Quadro 4.13 - Valores médios dos resultados obtidos nos provetes B\_C1\_16 e B\_C2\_16.

PROVETES	B_C2_16				PROVETES	B_C1_16		
	$\tau_{d,max}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,atrito}$ [MPa]			$\tau_{d,max}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,atrito}$ [MPa]
<b>7</b>	21,68*	encurvou			<b>10</b>	12,65	5,89	5,06
<b>8</b>	20,52*	encurvou			<b>11</b>	11,40	5,19	4,56
<b>9</b>	21,16*	encurvou			<b>12</b>	12,97	5,15	5,19
<b>MÉDIA</b>	21,12*	---			<b>MÉDIA</b>	12,34	5,41	4,94

\* valor condicionado pela encurvadura do varão

Tal como para os provetes anteriormente estudados, também perante uma maior área relativa das nervuras transversais a resistência do betão assume um papel importante.

O desempenho da ligação em betões com resistência mais elevada revela-se muito superior, possuindo um comportamento mais rígido. Mais uma vez, apesar de não ter sido possível atingir

a tensão de aderência máxima, os provetes B\_C2\_16 atingiram tensões de aderência cerca de 42% superiores ao registado para tensões de aderência máxima nos provetes B\_C1\_16.

É de notar que a diferença obtida nesta comparação é superior à diferença obtida nos provetes homólogos com menor área relativa das nervuras transversais (A\_C1\_16 *versus* A\_C2\_16) revelando que o desempenho dos provetes B\_C2\_16 é melhor que os do lote A\_C2\_16. Em face destes resultados, estranha-se o desempenho obtido pelos provetes B\_C1\_16.

Como se verá adiante, estes ensaios revelaram conclusões próximas do obtido para o caso de estudo de tração, em que a resistência do betão assume um papel fulcral para o bom desempenho da ligação.

#### **PROVETES A\_C2\_16 *VERSUS* PROVETES AT\_C2\_25**

Para se avaliar a influência do diâmetro dos varões no comportamento da ligação, comparam-se agora os resultados obtidos nos provetes dos lotes A\_C2\_16 e AT\_C2\_25 (Figura 4.14 e Quadro 4.14). Neste caso, sublinha-se que o fato do varão possuir um tratamento térmico em nada influencia os resultados obtidos, uma vez que o tratamento térmico apenas conduz a uma redução da tensão de cedência dos varões, o que é relevante apenas para solicitações em tração.

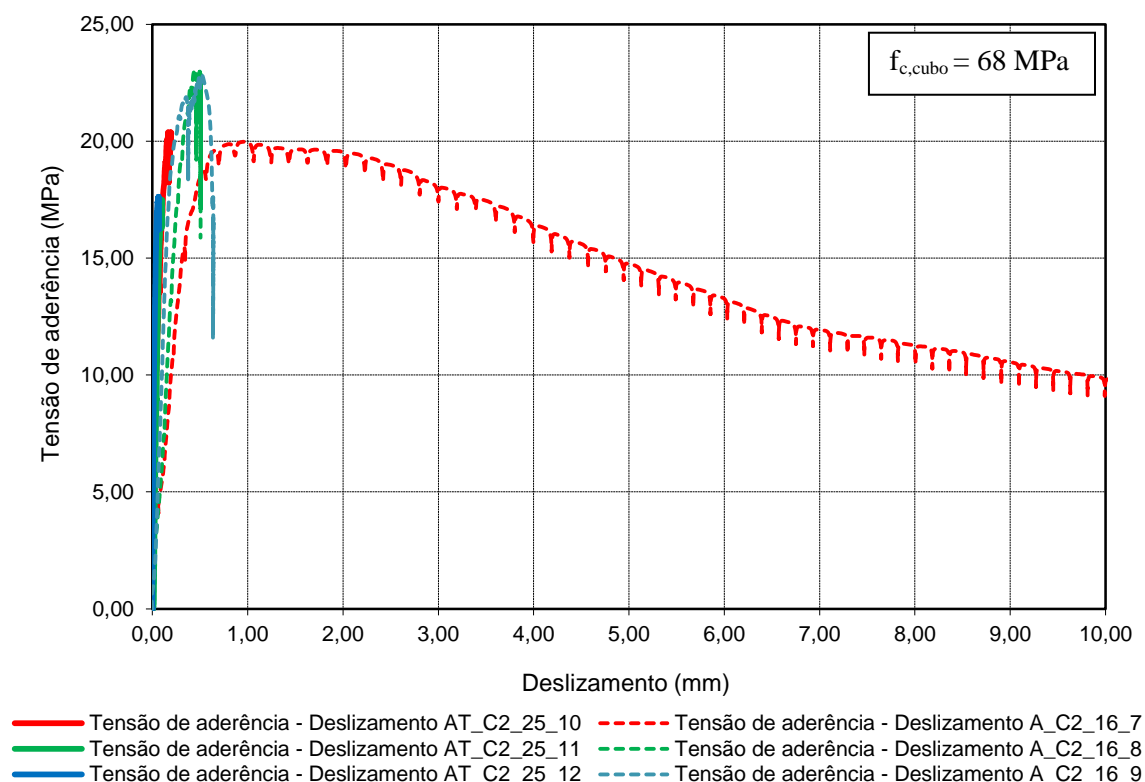


Figura 4.14 - Análise comparativa dos resultados obtidos nos provetes A\_C2\_16 e AT\_C2\_25.

Quadro 4.14 - Valores médios dos resultados obtidos nos provetes A\_C2\_16 e AT\_C2\_25.

PROVETES	A_C2_16			PROVETES	AT_C2_25		
	$\tau_{d,max}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,atrito}$ [MPa]		$\tau_{d,max}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,atrito}$ [MPa]
7	19,97	9,14	7,99	10	20,39*	encurvou	
8	23,01*	encurvou		11	17,49*	encurvou	
9	21,88*	encurvou		12	17,62*	encurvou	
<b>MÉDIA</b>	21,62*	---		<b>MÉDIA</b>	18,50*	---	

\* valor condicionado pela encurvadura do varão

A análise da Figura 4.14 permite concluir que os provetes do lote AT\_C2\_25 apresentam uma maior rigidez do ramo ascendente da relação tensão de aderência-deslizamento. Tal facto pode estar associado à maior área relativa das nervuras transversais dos varões de 25 mm ( $f_R=0,097$  contra  $f_R=0,081$  dos varões de 16 mm).

A encurvadura dos varões nos provetes do lote AT\_C2\_25 ocorreu para valores da tensão de aderência inferiores aos do lote A\_C2\_16, apesar do aumento do diâmetro. Este facto, conjugado com a maior rigidez do ramo ascendente, deixa antever a necessidade de se esclarecer melhor esta situação, uma vez que as tensões de aderência tendem a diminuir com o aumento do diâmetro, nos ensaios com arranque em tração.

Tendo ocorrido encurvadura em quase todos os provetes, exceto no A\_C2\_16\_7 pelas razões já explicadas neste trabalho, não é possível tecer considerações relativamente à tensão de aderência máxima. Ainda assim, é possível verificar que a diferença de tensões para as quais ocorre a encurvadura entre estes dois lotes difere em 15%, sendo expectável que a diferença um pouco superior não fosse justificada pelo facto do provete A\_C2\_16\_7 não possuir um comportamento semelhante aos restantes.

#### **PROVETES AT\_C1\_25 *VERSUS* PROVETES BT\_C1\_16**

Perante a necessidade de ensaiar os provetes BT\_C1\_16, é possível avaliar o efeito do diâmetro em betões de menor resistência, perante aproximadamente os mesmos valores de área relativa das nervuras transversais (Figura 4.15 e Quadro 4.15).



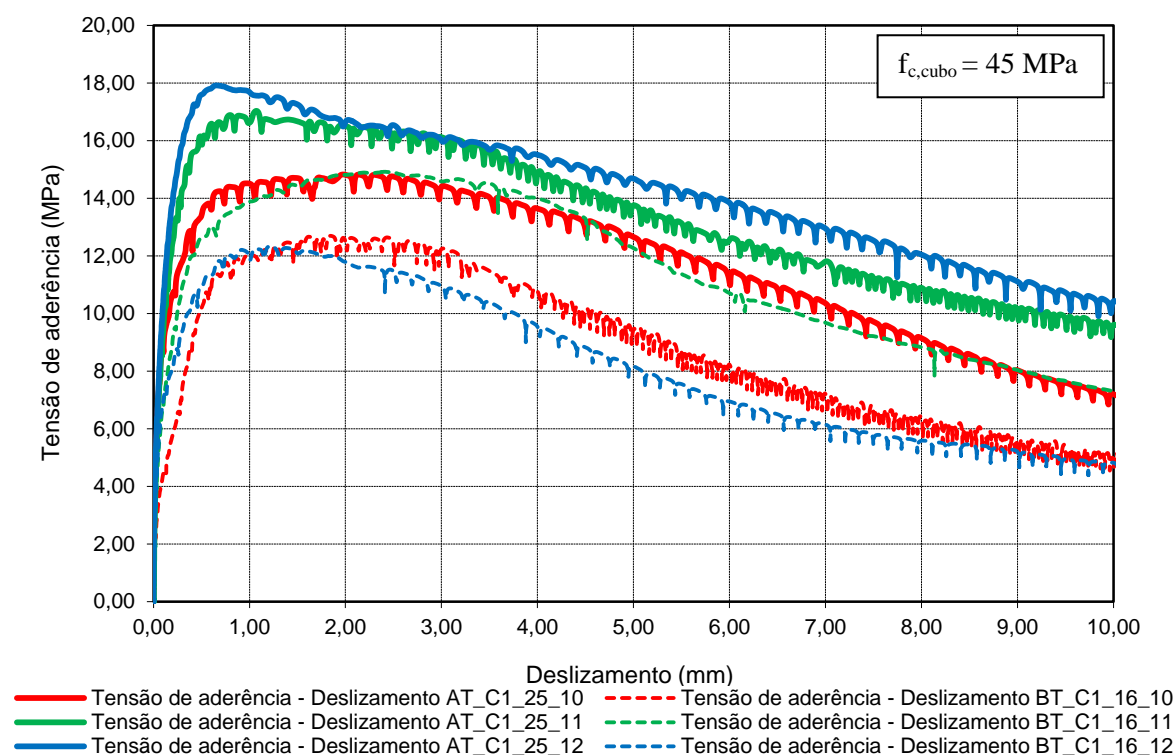


Figura 4.15 - Análise comparativa dos resultados obtidos nos provetes AT\_C1\_25 e BT\_C1\_16.

Quadro 4.15 - Valores médios dos resultados obtidos nos provetes AT\_C1\_25 e BT\_C1\_16.

PROVETES	AT_C1_25				PROVETES	BT_C1_16		
	$\tau_{d,max}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,atrito}$ [MPa]			$\tau_{d,max}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,atrito}$ [MPa]
<b>10</b>	14,83	8,72	5,93		<b>10</b>	12,70	6,05	5,08
<b>11</b>	17,03	9,40	6,81		<b>11</b>	14,92	7,57	5,97
<b>12</b>	17,92	10,50	7,17		<b>12</b>	12,34	6,94	4,94
<b>MÉDIA</b>	16,59	9,54	6,64		<b>MÉDIA</b>	13,32	6,85	5,33

Os provetes com varões de 25 mm registaram valores de tensão de aderência média sensivelmente superiores aos registados para o diâmetro de 16 mm. Este resultado é consistente com a maior tensão de aderência máxima registada para os varões de 25 mm, cerca de 20%. Constata-se, assim, que os resultados obtidos nestes provetes estão de acordo com o verificado nos provetes com betão de resistência mais elevada.

### PROVETES AT\_C1\_25 VERSUS PROVETES BT\_C1\_25 COM DESCARGA

A última variável cuja influência se pretende avaliar é a situação em que existe descarga da força de compressão sem que ocorra a inversão do sentido da mesma. Esta análise baseia-se em provetes com varões em que a área relativa das nervuras transversais é muito semelhante ( $f_R=0,097$  nos provetes AT e  $f_R=0,101$  nos provetes BT). Os resultados obtidos apresentam-se na Figura 4.16 e no Quadro 4.16.

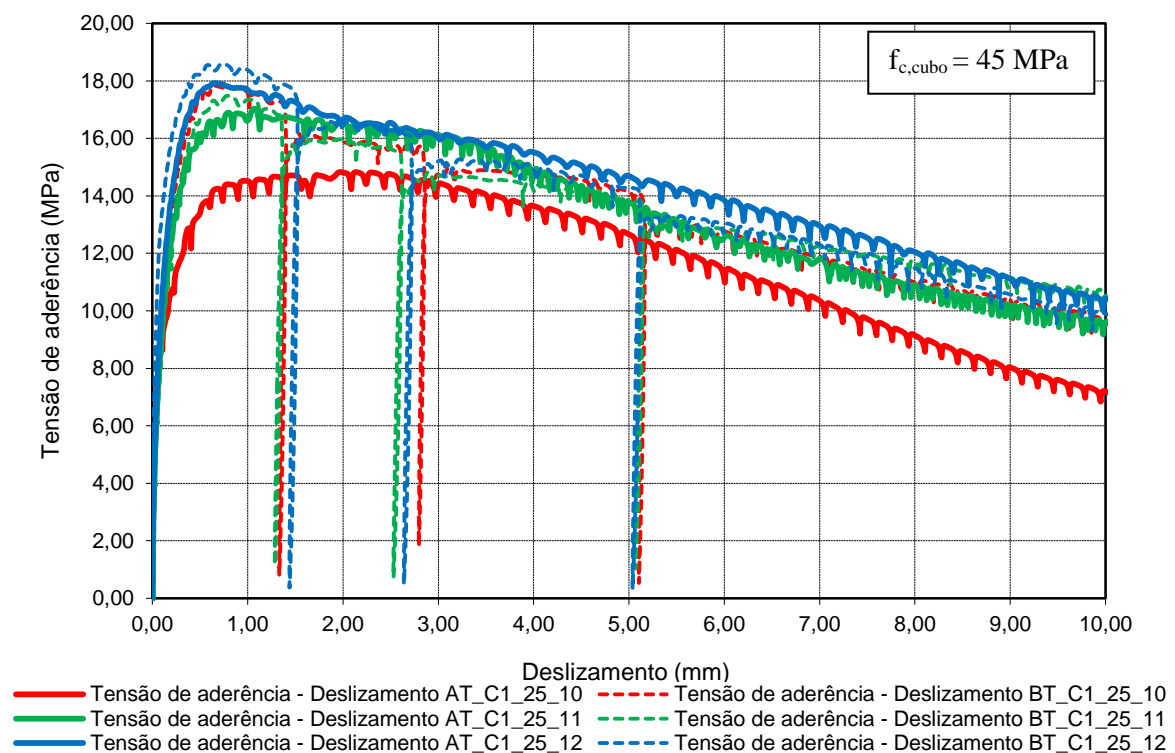


Figura 4.16 - Análise comparativa dos resultados obtidos nos provetes AT\_C1\_25 e BT\_C1\_25.

Quadro 4.16 - Valores médios dos resultados obtidos nos provetes AT\_C1\_25 e BT\_C1\_25.

AT_C1_25				BT_C1_25 C/ DESCARGA			
PROVETES	$\tau_{d,max}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,atrito}$ [MPa]	PROVETES	$\tau_{d,max}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,atrito}$ [MPa]
<b>10</b>	14,83	8,72	5,93	<b>10</b>	17,83	10,09	7,13
<b>11</b>	17,03	9,40	6,81	<b>11</b>	17,48	6,69	7,00
<b>12</b>	17,92	10,50	7,17	<b>12</b>	18,59	12,41	7,44
<b>MÉDIA</b>	16,59	9,54	6,64	<b>MÉDIA</b>	17,97	10,73	7,19

Tendo em consideração que o provete AT\_C1\_25\_10 possui valores de tensão de aderência mais baixos (o que reduz ligeiramente os valores médios do seu lote), todos os restantes provetes revelam comportamentos muito idênticos entre si. Assim, é de fácil conclusão que a existência de descarga sem que ocorra inversão do sentido da mesma, em nada influencia a prestação da ligação aço-betão, como é possível verificar pelo traçado dos gráficos dos provetes (Figura 4.16). Também quantitativamente, a perda entre a tensão máxima de aderência e a aderência por atrito, regista um valor de 9,95 MPa para o lote AT\_C1\_25 e 10,78 MPa para o lote BT\_C1\_25, representando assim uma diferença mínima e dentro das diferenças dos valores médios entre eles.

É também possível verificar pelo Quadro 4.9 que a perda de tensão de aderência em cada ciclo de carga/descarga, corresponde ao traçado típico da envolvente monotónica, sendo a diferença entre o 1º e o 2º ciclo de 1,79 MPa, e de 1,25 MPa nos ciclos seguintes.

### 4.3 - Análise comparativa dos resultados dos ensaios monotónicos em compressão e em tração

Na sequência do trabalho desenvolvido por Ana Sofia Louro (1), pretende-se agora verificar em que medida a direção de carregamento influencia o comportamento da ligação aço-betão. Desta forma, nos parágrafos seguintes comparam-se os resultados obtidos nos ensaios monotónicos com arranque em tração e em compressão, com o intuito de melhor caracterizar o fenómeno da

perda de aderência, em termos de tensão média e da tensão de aderência máxima. Para tal, calcula-se a diferença relativa obtida, tendo por base os resultados obtidos em compressão.

### **PROVETES A\_C1\_16**

De uma forma geral, os resultados obtidos nos ensaios monotónicos com arranque em tração (1) mostram-se muito consistentes com os obtidos neste trabalho (ver Quadro 4.17).

Todos os provetes revelam consistência de resultados também entre si, havendo por coincidência um provete de tração e outro de compressão que demonstram um acréscimo na tensão de aderência máxima atingida, face aos restantes. Como esse acréscimo é sensivelmente da mesma ordem de grandeza em relação à média dos dois tipos de ensaio, considera-se que o mesmo (0,81MPa) é pouco significativo.

Globalmente, verifica-se que, nos ensaios monotónicos com arranque em compressão, a tensão de aderência máxima é cerca de 5% superior à obtida nos ensaios monotónicos com arranque em tração.

Relativamente à tensão de aderência média, os resultados obtidos são muito semelhantes, demonstrando assim que a rigidez da ligação é muito idêntica.

Quadro 4.17 - Comparação dos resultados obtidos nos provetes A\_C1\_16 para ensaios monotônicos com arranque em compressão e em tração.

	A_C1_16			
	Compressão	Tração	Compressão	Tração
	$\tau_{d,m\acute{a}x}$ [MPa]		$\tau_{d,m\acute{e}d}$ [MPa]	
<b>PROVETES</b>	15,04	16,70	8,41	10,36
	17,21	14,89	9,14	7,29
	14,95	13,18	7,42	8,07
<b>MÉDIA</b>	15,73	14,92	8,32	8,57
<b>DIFERENÇA</b>	<b>5,15%</b>		<b>3,0%</b>	

#### PROVETES A\_C2\_16

Nos casos dos ensaios de provetes em que ocorreu a encurvadura do varão, não é possível tirar conclusões muito precisas sobre as diferenças que ocorrem em compressão e em tração.

Para o caso de compressão, o único provete que não sofreu de encurvadura não se pode considerar 100% representativo do seu lote, uma vez que a perda de rigidez registada terá levado a uma diminuição da tensão máxima de aderência alcançada, como já explicado anteriormente. Desta forma, não tendo ocorrido encurvadura para este provete e uma vez que a perda de rigidez não parece muito acentuada no gráfico, é possível afirmar a proximidade ao limite da tensão de aderência para o provete, sendo expectável que, em compressão, as tensões de aderência médias fossem pouco superiores às registadas em tração.

Ainda que os dados das tensões de aderência média sejam menores, o mesmo raciocínio é aqui aplicável, não se devendo considerar a diferença de 43.9% como representativa da diferença de rigidez registada pela ligação.

Quadro 4.18 - Comparação dos resultados obtidos nos provetes A\_C2\_16 para ensaios monotônicos com arranque em compressão e em tração.

A_C2_16				
	Compressão	Tração	Compressão	Tração
	$\tau_{d,máx}$ [MPa]		$\tau_{d,méd}$ [MPa]	
PROVETES	19,97	21,69	9,14	11,85
	23,01*	21,95	encurvou	15,91
	21,88*	22,80	encurvou	11,70
MÉDIA	21,62	22,15	9,14	13,15
DIFERENÇA	2,4%		43,9%	

\* valor condicionado pela encurvadura do varão

### PROVETES AT\_C1\_25

Nos provetes do lote AT\_C1\_25 não se verifica uma discrepância muito acentuada, uma vez que apenas um dos provetes ensaiados à compressão registou tensão máxima de aderência ligeiramente inferior aos restantes.

Ainda assim, na comparação dos resultados dos ensaios à compressão e à tração, regista-se um aumento de cerca de 15%, quer na tensão de aderência máxima alcançada, quer na tensão de aderência média (ver Quadro 4.19).

Salienta-se também que, comparativamente ao lote A\_C1\_16, onde as propriedades dos provetes que variam são o diâmetro do varão e a área relativa das nervuras transversais, verifica-se que houve um aumento da diferença da tensão máxima de aderência e da tensão de aderência média na ligação de 5,1% para 13,4% e de 3,0% para 15,5%, respetivamente.

Quadro 4.19 - Comparação dos resultados obtidos nos provetes AT\_C1\_25 para ensaios monotônicos com arranque em compressão e em tração.

AT_C1_25				
	Compressão	Tração	Compressão	Tração
	$\tau_{d,m\acute{a}x}$ [MPa]		$\tau_{d,m\acute{e}d}$ [MPa]	
<b>PROVETES</b>	14,83	13,66	8,72	7,44
	17,03	14,66	9,40	8,20
	17,92	14,77	10,50	8,54
<b>MÉDIA</b>	16,59	14,4	9,54	8,06
<b>DIFERENÇA</b>	<b>13,4%</b>		<b>15,5%</b>	

#### PROVETES AT\_C2\_25

Na presença de um betão com resistência mais elevada não foi possível encontrar o valor da tensão máxima de aderência, sendo os resultados assim obtidos relativos à tensão de aderência para a qual ocorreu a encurvadura do varão (ver Quadro 4.20).

Tendo-se verificado a encurvadura do varão para tensões inferiores ao deslizamento de 1 mm, também o valor da tensão de aderência média não é calculável. Contudo, foram atingidas tensões de aderência para deslizamento de 0,01 mm e 0,1 mm.

O conhecimento da tensão de aderência para estes valores de deslizamento permite afirmar que, na fase inicial dos ensaios em compressão, o comportamento da ligação aço-betão se revela mais rígido, alcançando-se valores de tensão superior para 0,01 mm na compressão e acentuando-se ainda mais essa diferença para 0,1 mm de deslizamento.

Assim, pode afirmar-se que, neste caso, existe uma tendência que aponta para que a tensão de aderência máxima seja mais elevada em compressão do que em tração, embora não seja possível quantificar esse aumento.

Quadro 4.20 - Comparação dos resultados obtidos nos provetes AT\_C2\_25 para ensaios monotônicos com arranque em compressão e em tração.

AT_C2_25				
	Compressão	Tração	Compressão	Tração
	$\tau_{d,m\acute{a}x}$ [MPa]		$\tau_{d,m\acute{e}d}$ [MPa]	
<b>PROVETES</b>	20,39*	18,77	encurvou	11,02
	17,49*	18,84	encurvou	11,43
	17,62*	19,84	encurvou	12,43
<b>MÉDIA</b>	18,50	19,15	---	11,63
<b>DIFERENÇA</b>	<b>3,51%</b>		---	

\* valor condicionado pela encurvadura do varão

#### PROVETES B\_C1\_16

Os ensaios efetuados nos provetes do lote B\_C1\_16 foram os que revelaram uma maior discrepância de resultados, quando comparados com os seus homólogos ensaiados em tração (Quadro 4.21). No entanto, e como já referido anteriormente, os ensaios foram repetidos no lote de provetes com as mesmas propriedades para ensaio em compressão, verificando-se nas repetições a mesma tendência.

Nestes provetes, a tensão de aderência média registada nos ensaios em tração atingiu, sensivelmente, o dobro do valor atingido pelos provetes em compressão. Sendo que a rigidez de ligação se encontra diretamente relacionada com os valores de tensão de aderência máxima, os provetes sujeitos a compressão registaram valores de tensão de aderência máxima sensivelmente 50% inferiores aos provetes sujeitos a tração.



Quadro 4.21 - Comparação dos resultados obtidos nos provetes B\_C1\_16 para ensaios monotónicos com arranque em compressão e em tração.

<b>B_C1_16</b>				
	Compressão	Tração	Compressão	Tração
	$\tau_{d,m\acute{a}x}$ [MPa]		$\tau_{d,m\acute{e}d}$ [MPa]	
<b>PROVETES</b>	12,65	17,15	5,89	10,31
	11,40	17,44	5,19	9,37
	12,97	19,34	5,15	13,22
<b>MÉDIA</b>	12,34	17,98	5,41	10,97
<b>DIFERENÇA</b>	<b>45,7%</b>		<b>102,7,%</b>	

#### **PROVETES B\_C2\_16**

Para os ensaios do lote B\_C2\_16, voltou a estar presente o fenómeno de encurvadura do varão associado à utilização do betão com resistência mais elevada (Quadro 4.22). Por sua vez, nos provetes ensaiados em tração ocorreu a plastificação do varão, sendo que, analogamente, o valor da tensão de aderência máxima não é tão elevado como deveria. Contudo, salienta-se que a simulação do comportamento de uma zona de ligação viga-pilar, pode envolver ambos os fenómenos.

Não sendo possível obter valores da tensão de aderência média, analisaram-se as tensões registadas pelos provetes para deslizamentos de 0,01 e 0,1 mm. Os resultados obtidos permitem concluir que os provetes com betão de resistência mais elevada sujeitos a esforços em compressão atingem valores de tensão de aderência sensivelmente duas vezes superiores, revelando assim uma ligação aço-betão muito mais rígida, sendo assim expectável que se alcancem valores muito superiores aos alcançados nos provetes sujeitos à tração.

Quadro 4.22 - Comparação dos resultados obtidos nos provetes B\_C2\_16 para ensaios monotónicos com arranque em compressão e em tração.

	B_C2_16			
	Compressão	Tração	Compressão	Tração
	$\tau_{d,m\acute{a}x}$ [MPa]		$\tau_{d,m\acute{e}d}$ [MPa]	
<b>PROVETES</b>	21,68*	23,45	encurvou	16,26
	20,52*	20,65	encurvou	9,61
	21,16*	22,39	encurvou	12,51
<b>MÉDIA</b>	21,12*	22,16	---	12,79
<b>DIFERENÇA</b>	<b>4,94%</b>		---	

\* valor condicionado pela encurvadura do varão

#### PROVETES BT\_C1\_25 COM DESCARGA

Como já tinha sido anteriormente verificado, o facto de existir descarga durante o ensaio, sem que ocorra inversão do sentido de carga, em nada influencia os resultados obtidos, sendo assim possível comparar os resultados agora obtidos com os dos ensaios monotónicos com arranque em tração.

Através da análise do Quadro 4.23 verifica-se que todos os provetes dos ensaios em tração e em compressão apresentaram uma boa consistência de resultados entre si, verificando-se um aumento da tensão de aderência máxima de 20% nos ensaios de compressão, acompanhados de igual aumento da tensão de aderência média.

Quadro 4.23 - Comparação dos resultados obtidos nos provetes BT\_C1\_25 para ensaios monotônicos com arranque em compressão com descarga e em tração sem descarga.

BT_C1_25 C/ DESCARGA				
	Compressão	Tração	Compressão	Tração
	$\tau_{d,m\acute{a}x}$ [MPa]		$\tau_{d,m\acute{e}d}$ [MPa]	
PROVETES	17,83	13,86	10,09	7,54
	17,50	14,73	9,69	9,39
	18,59	14,55	12,41	8,52
MÉDIA	17,97	14,38	10,73	8,48
DIFERENÇA	20,0%		20,9%	



# **CAPÍTULO 5**

## **Conclusões e Perspetivas de trabalhos futuros**



## 5.1 - Síntese do trabalho efetuado

Este trabalho surge na continuação do estudo efetuado por Ana Sofia Louro (1), o qual teve como objetivo caracterizar a aderência de varões nervurados sujeitos a ações repetidas e alternadas. O referido trabalho avaliou a influência de diversas variáveis que afetam o desempenho de uma zona de ligação, em termos de aderência, quando sujeita a um carregamento monotónico em tração e também quando a mesma é sujeita a ações cíclicas com arranque em tração.

Assim, perante a proposta de trabalho futuro sugerido pela autora e após estudo da bibliografia existente, efetivou-se a necessidade de caracterizar a aderência para situações de compressão em regime monotónico.

Considerando que havia provetes remanescentes do trabalho de Ana Sofia Louro (1), delineou-se um programa experimental que permitisse compreender melhor os fenómenos que afetam a interface aço-betão, quando a mesma é submetida a um carregamento monotónico de compressão. A escolha dos provetes a ensaiar baseou-se na necessidade de comparar os resultados obtidos neste estudo com os anteriormente obtidos nos ensaios monotónicos com arranque em tração.

Para tal, foi avaliada a influência das principais variáveis que intervêm na prestação da aderência aço-betão: a área relativa das nervuras transversais ( $f_R$ ), a resistência do betão, o diâmetro do varão e a história de carga.

Relativamente ao perfil nervurado, os provetes ensaiados possuem dois níveis de área relativa das nervuras transversais (A e B). No primeiro caso pretendia-se caracterizar o desempenho de varões com menor altura das nervuras, ou seja, mais próximo do mínimo aceitável pelas especificações em vigor. Os lotes do tipo B, correspondem a material com maior área relativa das nervuras, de forma a avaliar se a sua seleção seria ou não benéfica para o desempenho dos elementos estruturais.

Quanto ao tipo de betão, foi utilizado um betão de menor resistência (C1) e um betão com uma resistência mais elevada (C2). De acordo com a bibliografia e uma vez que a classe do betão possui grande relevância na performance da ligação aço-betão, foram usadas duas classes de betões, sendo uma representativa dos betões utilizados nas construções correntes e outro nas construções de maior importância.

Os provetes foram executados com varões de 16 e 25 mm de diâmetro. Como anteriormente referido, a regulamentação apenas faz referência a reduções da tensão de aderência para diâmetros superiores a 32 mm. Contudo, como valores superiores a este diâmetro são também pouco utilizados devido à dificuldade do seu manuseamento em obra, optou-se assim por avaliar as influências no aumento de diâmetro para 25 mm.

Sendo a história de carga um fenómeno que pode conduzir a variações significativas das tensões de aderência, para além dos ensaios monotónicos com arranque em compressão, foram realizados ensaios em que foram impostas descargas da força aplicada sem inversão do sentido da carga. Salienta-se também que os ensaios decorreram em controlo de deslocamento a uma velocidade constante de 1,7 mm/min.

### **5.1.1 - Principais conclusões**

#### **INFLUÊNCIA DA ÁREA RELATIVA DAS NERVURAS TRANSVERSAIS**

Contrariamente ao registado nos ensaios monotónicos com arranque em tracção, os resultados obtidos nos provetes com maior área relativa das nervuras transversais e em betão de resistência mais baixa, não evidenciam um aumento da rigidez do ramo ascendente da relação tensão de aderência-deslizamento nem o aumento da tensão de aderência máxima.

Considerando que os resultados obtidos nos provetes com betão de resistência mais elevada não corroboram os resultados anteriormente referidos, considera-se importante esclarecer se há ou não benefício na seleção de material com maior área relativa das nervuras transversais, uma vez que todos os resultados até aqui obtidos apontam em sentido favorável.

#### **INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DO BETÃO**

Também a análise e comparação dos resultados de provetes onde apenas se alterou a resistência do betão permite tirar conclusões muito interessantes. A comparação do lote A\_C1\_16 com o lote A\_C2\_16 realça a importância da resistência à compressão do betão utilizado, registando-se aumentos significativos da ordem dos 38%, até se ter atingido a encurvadura do varão. O mesmo se registou na comparação dos provetes B\_C1\_16 com os provetes B\_C2\_16, sendo aqui a diferença mais notória, na ordem dos 42 %, devido aos valores anormalmente baixos



registados pelos provetes B\_C1\_16. Nesta comparação de ensaios, é de especial importância notar que, dos 4 lotes de provetes, a melhoria da resistência do betão assumiu particular importância nos lotes B\_XX\_16, passando da pior prestação registada com betões de menor resistência para a melhor com betão de resistência mais elevada. Embora tivesse ocorrido encurvadura e plastificação do varão dos provetes com betão C2, a análise dos gráficos e das tensões aos deslizamentos de 0,01 mm e 0,1 mm mostram a maior rigidez de ligação, sendo assim esperada a melhoria da tensão de aderência.

### **INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DO VARÃO**

Analizando os lotes A\_C2\_16 e AT\_C2\_25 para estudo da influência do diâmetro do varão, concluiu-se que os varões com o maior diâmetro possuem uma rigidez de ligação ligeiramente mais elevada, o que conduz a um ligeiro aumento das tensões de aderência máxima. Contudo, como os resultados obtidos podem estar associados à maior área relativa das nervuras transversais dos varões de 25 mm, quando comparados com os varões de 16 mm, não é possível assegurar que existe uma inversão da influência do diâmetro. Ou seja, nos ensaios monotónicos com arranque em compressão não é evidente que haja um acréscimo das tensões de aderência associadas à influência do diâmetro. A confirmarem-se estes resultados, contrariam-se os resultados obtidos nos ensaios monotónicos com arranque em tração.

### **INFLUÊNCIA DA HISTÓRIA DE CARGA**

Quanto ao estudo da história de carga, foi possível verificar que o processo de descarga, desde que não ocorra inversão do sentido de carga, em nada influencia os resultados, uma vez que a envolvente monotónica apresenta mais ou menos a mesma configuração nos ensaios com e sem descarga.

Em suma, o trabalho elaborado confirma que a influência da resistência do betão é a mesma nos ensaios monotónicos com arranque em compressão e nos ensaios monotónicos com arranque em tração. Relativamente à influência da maior área relativa das nervuras transversais e do diâmetro, os resultados obtidos não são totalmente esclarecedores pelo que se considera que seria útil desenvolver uma nova campanha experimental.

## 5.2 - Perspetivas de trabalhos futuros

Tendo o presente trabalho utilizado os provetes remanescentes da dissertação da autora (1), revelou-se impossível alcançar em ensaio os valores de tensão máxima de aderência para betões de maior resistência.

Na presença deste facto, e de modo a melhor quantificar e avaliar as propriedades neste tipo de betões, deverão ser executados e ensaiados provetes à compressão, em regime monotónico, que visem minorar o fenómeno de encurvadura do varão. Para tal, estes provetes deverão possuir a zona aderente junto à parte superior do mesmo, como sugerido na Figura 5.1, de modo a evitar a ocorrência de encurvadura. Da mesma forma, de modo a minorar o máximo possível o mesmo efeito, também a distância entre o cabeçote superior da máquina e o provete deverá ser a menor possível, aconselhando-se a análise até 25 mm de deslizamento, conseguindo-se desta forma caracterizar melhor a influência da área relativa das nervuras transversais e do diâmetro.

Também para melhor compreensão e estudo de todos os fenómenos existentes na interface aço-betão durante uma situação de sismo, numa zona de ligação entre elementos de betão armado, considera-se que devem ser executados ensaios cíclicos com arranque em compressão para comparação com os resultados obtidos nos ensaios cíclicos com arranque em tração, já realizados no estudo desenvolvido por Ana Sofia Louro (1).

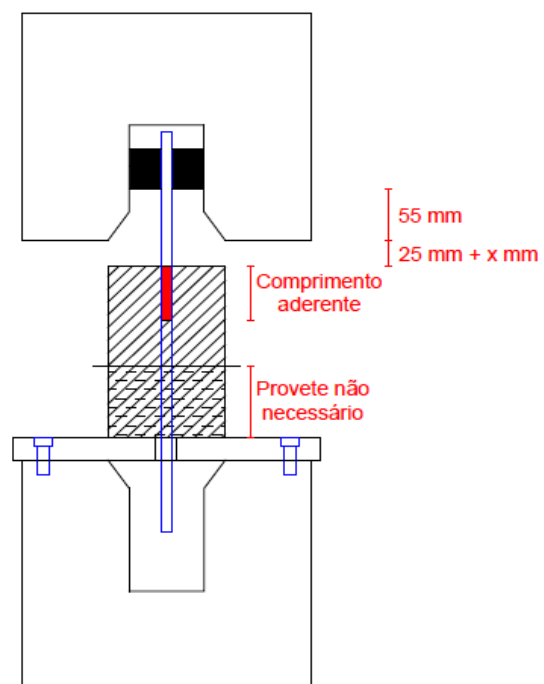


Figura 5.1 - Esquema sugestivo de melhorias a adotar para ensaio de arrancamento em compressão.



## **BIBLIOGRAFIA**



1. **Louro, Ana Sofia Miranda da Silva.** *Caracterização da aderência de varões nervurados sujeitos a ações repetidas e alternadas.* Lisboa : Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil; Especialidade em Estruturas; Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Maio 2014.
2. **NP EN 1992-1-1 - Eurocódigo 2: Projeto de estruturas de betão - Parte 1-1.** *Regras gerais.* Caparica, Portugal : IPQ - Instituto Português da Qualidade, 2010.
3. **Lemnitzer, L., Just, M. e Curbach, M.** *Bond in reinforced concrete under transverse tension.* Technische Universität Dresden, Dresden, Germany : 2012, Bond in Concrete 2012 – Bond in New Materials and under Severe Conditions; 2012 Publisher creations, ISBN: 978 - 88 - 907078 - 3 - 4.
4. **Soares, Joadelio Chagas.** *Aço-Concreto Geopolimérico: Correlação entre Tensão de Aderência e Comprimento de Ancoragem.* Campos dos Goytacazes : Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Novembro 2006.
5. **Eligehausen, Rolf, Popov, Egor P. e Bertero, Vitelmo V.** *Local Bond Stress-Slip Relationships of Deformed Bars Under Generalized Excitations; Report No UCB/EERC-83/23.* California : Earthquake Engineering Research Center; University of California; Berkeley, October 1983.
6. **Fernandes, Rejane Martins.** *A Influência das Ações Repetidas Na Aderência Aço-Concreto.* São Carlos : Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 2000.
7. **Louro, Sílvia Andrea Couveiro.** *Estudo da aderência aço – betão em elementos estruturais de BA.* : Dissertação apresentada para grau de Mestre em Engenharia Civil; Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil, 2011.
8. **Leonhardt, F.** *Construções de Concreto (Tradução: João Merino).* Rio de Janeiro : Interciência, 6v, 1979.
9. **Silva Filho, L.C.P., et al., et al.** 2012, Bond in Concrete 2012 – General Aspects of Bond J. *Analysis of the influence of rebar geometry variations on bonding strength in the pull-out test.;* 2012 Publisher creations, ISBN: 978 - 88 - 907078 - 1 - 0.

10. **Dominguez, Norberto.** *Etude de la Liaison Acier-Béton: De la modélisation du Phénomène à la Formulation d'un Élément fini enrichi "Béton Armé".* : Thèse de Doctorat, Laboratoire de Mécanique et Technologie; L'Ecole Normale Supérieure de Cachan; Cachan; France, 2005.
11. **Morgan, E.** *The effect of rust on reinforcement, Concrete (1).* 1998.
12. **TASK GROUP BOND MODELS.** *Bulletin 10 State-of-art report: "Bond of Reinforcement in Concrete".* : Federation International du Béton (fib), August 2000.
13. **Fischer, C. e Ožbolt, J.** 2012, *Bond in Concrete 2012 – General Aspects of Bond J. Influence of bar diameter and concrete cover on bond degradation due to.*; 2012 Publisher creations, ISBN: 978 - 88 - 907078 - 1 - 0.
14. **Ghoddoussi, P. e Cabrera, J. G.** *The effect of reinforcement corrosion on the strength of steel/concrete bond.* : Proc. Int. Conf. "Bond in Concrete: from Research to Practice", CEB-RTU (Riga Technical University), 1992.
15. **Ribeiro, J. L. D.** *Análise Experimental dos fatores que influenciam a aderência em barras nervuradas.* Porto Alegre : Tese (Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul -RS, 1985.
16. **Monteiro, P. J. M.** *Microstructure of Concrete and its influence on the mechanical properties.* California : 197pps.Tese (Doutorado).. University of California, Berkeley., 1985.
17. **DUCATTI, V.A. e AGOPYAN, V.** *Concreto de Elevado Desempenho: Estudo da Aderência com a Armadura.* São Paulo : Departamento de engenharia de construção civil, EPUSP (Boletim Técnico, BT/PCC/113)., 1993.
18. **VIEIRA, F.M.P.** *Estudo do Comportamento da Aderência das Barras de Aço no Concreto de Alta Resistência com Adição de Microsílica.* Porto Alegre : Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994.
19. **Magnusson, J.** *Bond and Anchorage of Ribbed Bars in High-Strength Concrete.* Göteborg; Sweden : PhDthesis; Division of Concrete Structures; Chalmers University of Technology, 2000.
20. **Comité Euro-Intemational du Béton (CEB).** *Bond action and bond behaviour of reinforcement.* : Bulletin d'information n° 151, (1982).
21. **Comité Européen du Béton (CEB).** *Acier - Adhgrence - Ancrage* : Bulletin d'information n° 66, (1968).



22. **Daoud, A. e Lorrain, M.** May 2003, Materials and Structures/Matériaux et Constructions *Influence de la position des armatures sur l'adhérence des bétons autoplatsants: interprétation par analyse d'image; Département de Génie Civil, INSA de Toulouse, France.*, Vol. 36, May 2003, pp 231-237.
23. **França, Valério Henrique.** *Aderência Aço-Concreto – Uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha.* Ilha Solteira : Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil; FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA; UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO", Agosto 2004.
24. **Soroushian, P., et al., et al.** *Bond of deformed bars to concrete: effects to confinement and strength of concrete* : ACI Materials Journal, v. 88, n. 3, (May/June), pp. 227-232, 1991.
25. **Reynolds, G. C. e Beddy, A.** *Bond Strength of deformed bars.* : Bond and Concrete 23°, Londres, P. Bartoz, 1982.
26. **Bamonte, P.F. e Gambarova, P.G.** *High-Bond Bars in NSC and HPC: Study on Size Effect and on the Local Bond Stress-Slip Law.* : Journal of Structural Engineering 133(2); pp. 225-234; 2007.
27. **Activity Group 5.** *Model Code 2010 Final Draft.* s.l. : Federation International du Béton (fib), September 2011.
28. **Wernisch, G. R.** *Bond Studies of Different Types of Reinforcing Bars.* : ACI Journal, Vol 34; pp.145-164; Detroit; USA; 1937.
29. **Goto, Y.** *Crack formed in concrete around deformed tension bars.* : ACI Journal, Vol. 68, nº4; pp. 244-251; 1971.
30. **Darwin, D. e Graham, E.K.** *Effect of Deformation Height and Spacing on Bond Strength of Reinforcing Bars:* ACI Structural Journal; 90-S65; pp. 646–657; 1993.
31. **Choi, O. C. e Lee, J. R.** *Bond in Concrete 2012 – General Aspects of Bond J.; Bearing angle model for bond analysis of reinforcing bars to concrete.*; 2012 Publisher creations, ISBN: 978 - 88 - 907078 - 1 - 0.
32. **Especificação LNEC E 449-2010: Varões de aço A400 NR para armaduras de betão.** *Características, ensaios e marcação.* Lisboa, Portugal.
33. **Especificação LNEC E 450-2010: Varões de aço A500 NR para armaduras de betão.** *Características, ensaios e marcação.* Lisboa, Portugal .

34. **Especificação LNEC E 455-2010: Varões de aço A400 NR de ductilidade especial para.** *Características, ensaios e marcação.* Lisboa, Portugal.
35. **Especificação LNEC E 456-2011: Varões de aço A500 ER para armaduras de betão.** *Características, ensaios e marcação.* Lisboa, Portugal.
36. **Especificação LNEC E 460-2010: Varões de aço A500 NR de ductilidade especial para armaduras de betão armado.** *Características, ensaios e marcação.* Lisboa, Portugal.
37. **Rehm, G.** *Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton.* - In: *Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton.* Nr. 138; Vertrieb durch Verlag von W. Ernst; Berlin; Germany; 1961.
38. **Soretz, S. e Hölzenbein, H.** *Einfluß der Rippenabmessungen von Beton-Bewehrungsstäben auf den Verbund und die Biegefähigkeit.* Betonstahl in Entwicklung TOR-ISTEG STEEL-Corporation; Heft 69; Germany; 1980.
39. **Bazant, Z. e Kaplan, M.** *Concrete at high temperatures: Material Properties and Mechanical Models.* 1996, Longman Group Limited.
40. *Influence of high temperatures on bond.* **Lublóy, É. e Balázs, G. L.** Bond in Concrete 2012 – Bond in New Materials and under Severe Conditions; 2012 Publisher creations, ISBN: 978 - 88 - 907078 - 3 - 4.
41. **Van de Veen, C.** *Cryogenic bond behavior and tension stiffening.* Riga (Latvia) : Proc. Int. Conf. "Bond in Concrete: from Research to Practice"; CEB-RTU (Riga Technical University), 1992.
42. **Emiroğlu, M., Subaşı, S. e Öztürk, H.** *Effects of waste ceramic powders on the bond strength of selfcompacting concrete.* Bond in Concrete 2012 – Bond in New Materials and under Severe Conditions; 2012 Publisher creations, ISBN: 978 - 88 - 907078 - 3 - 4.
43. **Gambarova, P. G., Rosati, G. P. e Zasso, B.** *Steel-Concrete bond after concrete splitting: (I) test results; (II) constitutive laws and interface deterioration.* : Materials and Structures, RILEM, 22, 35-47 and 347-356.
44. **Lúcio, Valter J. G.** *Estruturas de Betão Armado I.* s.l. : Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2010.
45. **Rehm, G. e Eligehausen, R.** *Bond of Ribbed Bars Under High-Cycle Repeated Loads.* : ACI Journal, Vol.76; No.2, Feb 1979, 297-309.

- 46. EN 1998 - 1: 2004 - Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part**  
**1. *General rules, seismic actions and rules for buildings.***



## **ANEXOS**

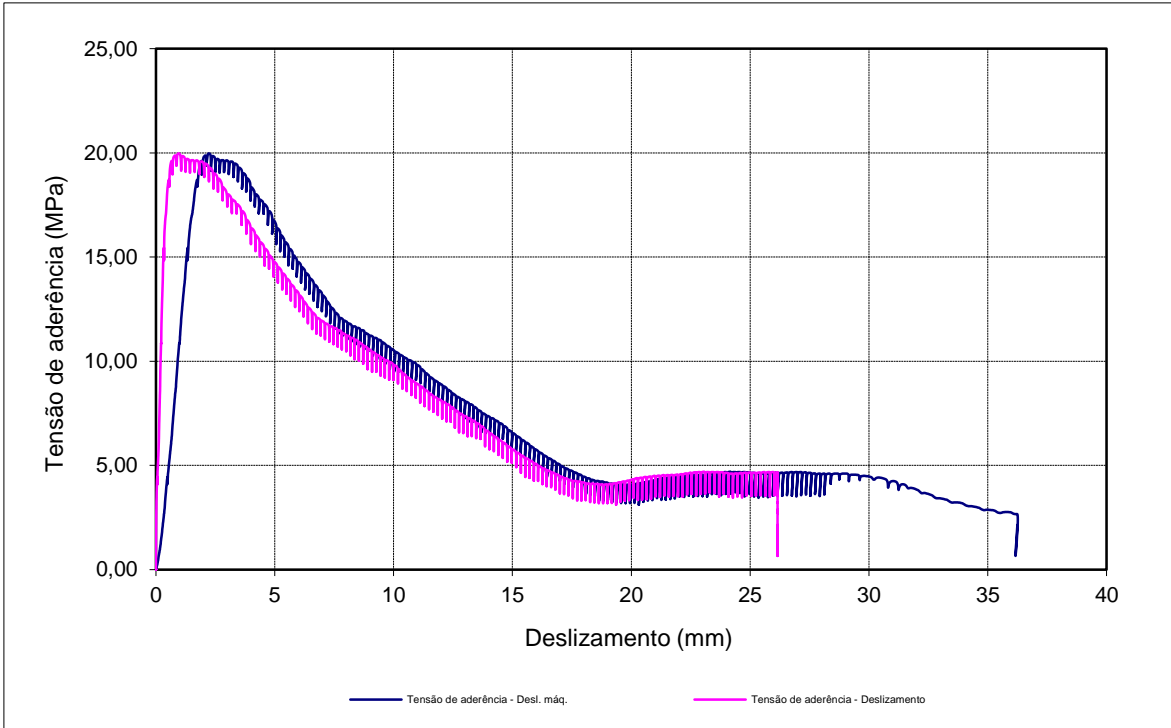
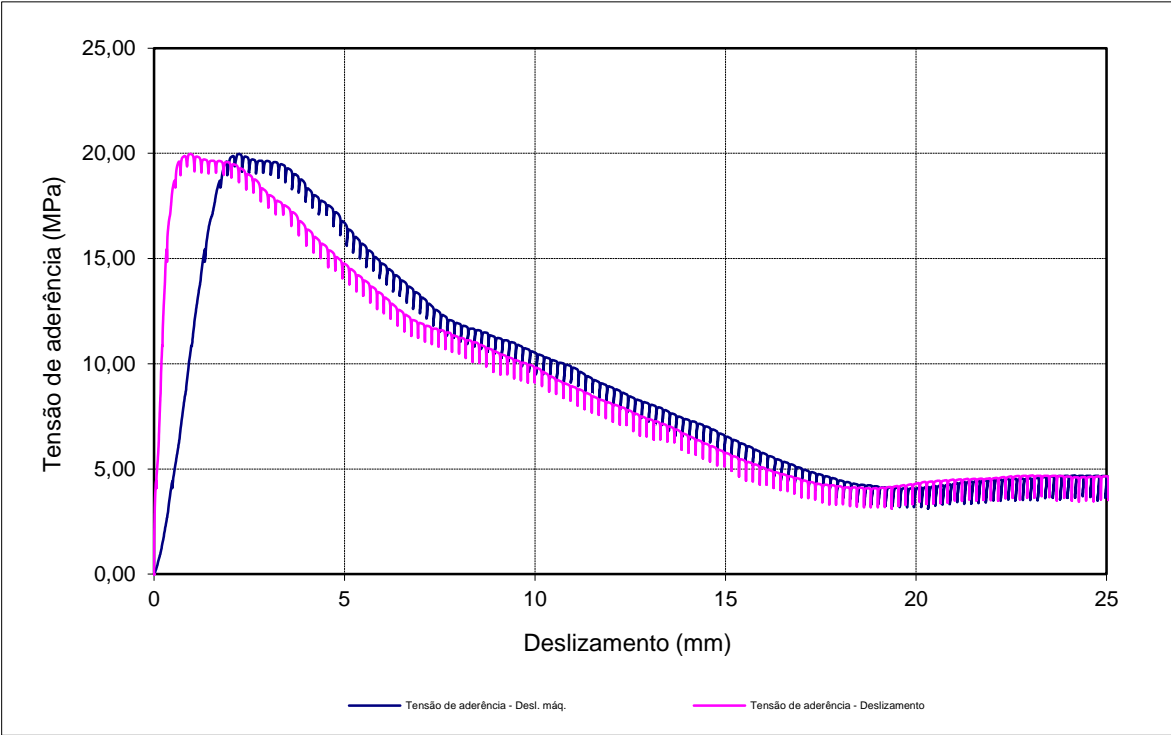
### **Resultados individuais dos ensaios**

Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	16
fr, média	0,081

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	68
fc [MPa]	57,1

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
2,08	5,39	19,95	9,14	19,97

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	36,26
Média dos dois CDP's	26,16



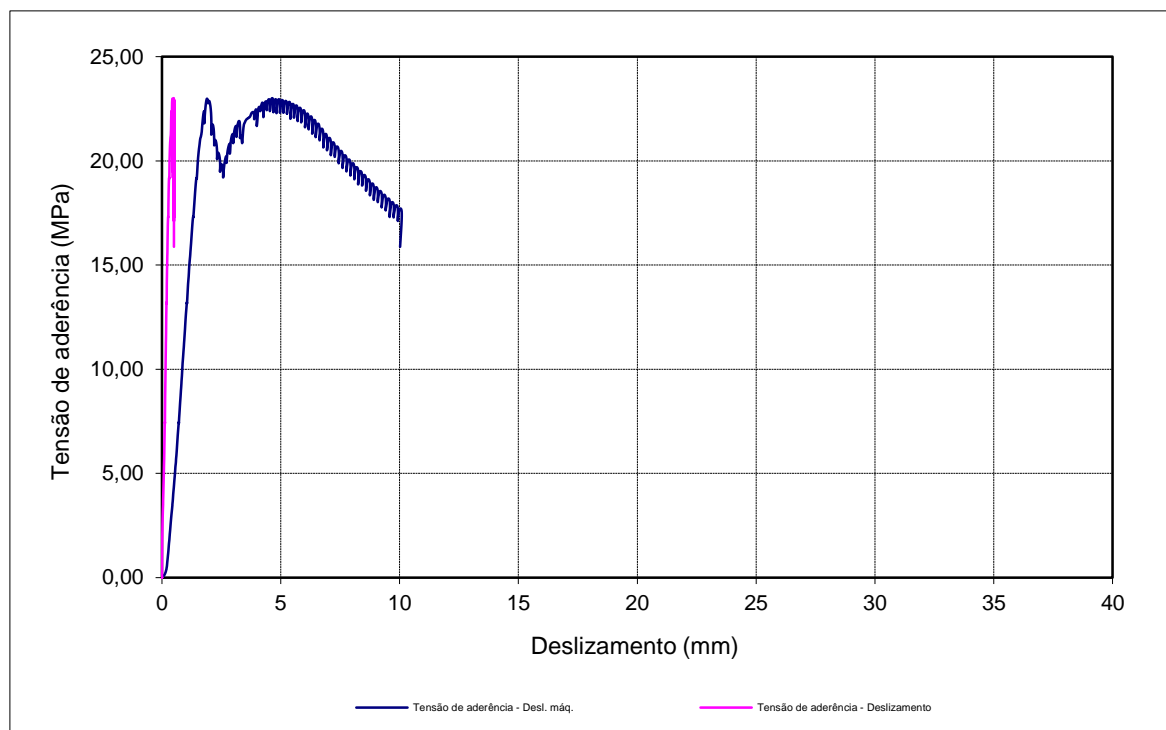
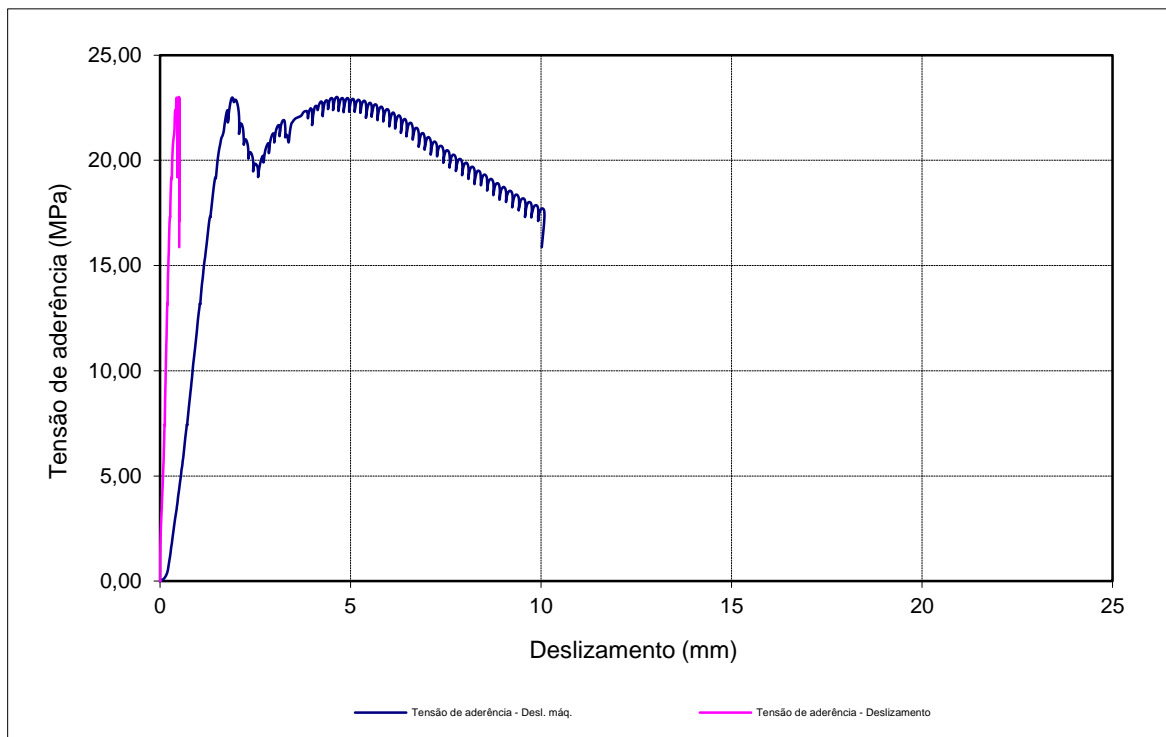
Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	16
fr, média	0,081

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	68
fc [MPa]	57,1

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
1,31	5,95	---	3,63	23,01

\* valores condicionados pela encurvadura do varão

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	10,09
Média dos dois CDP's	0,51



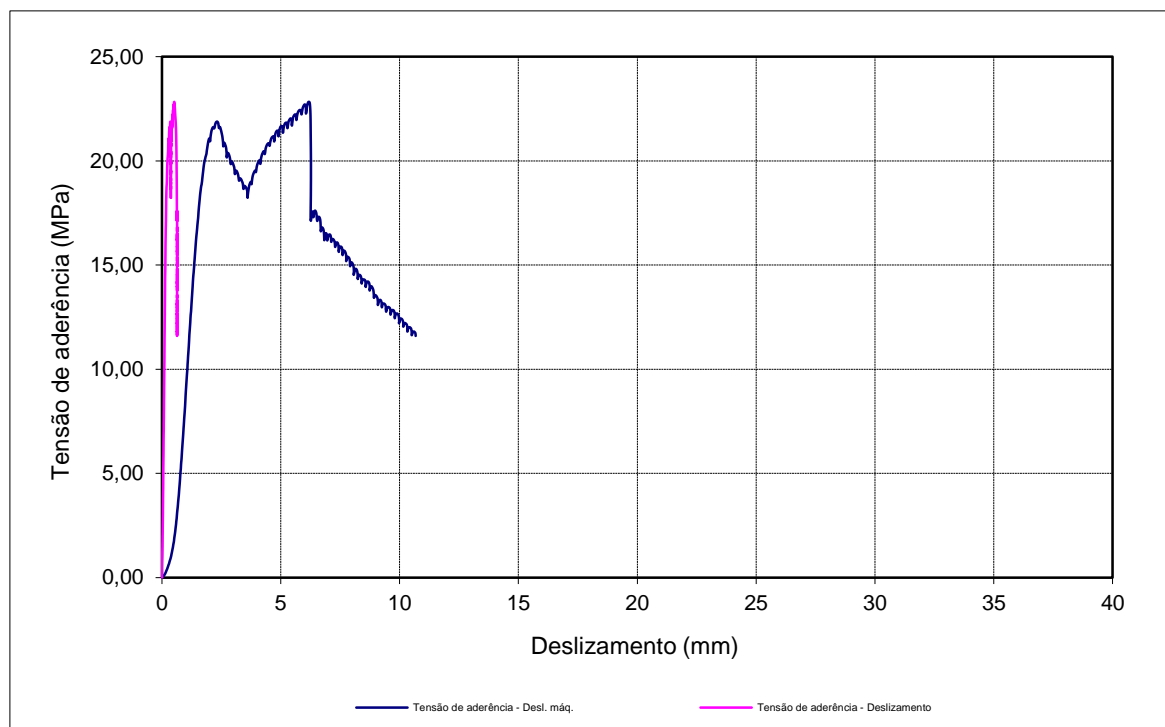
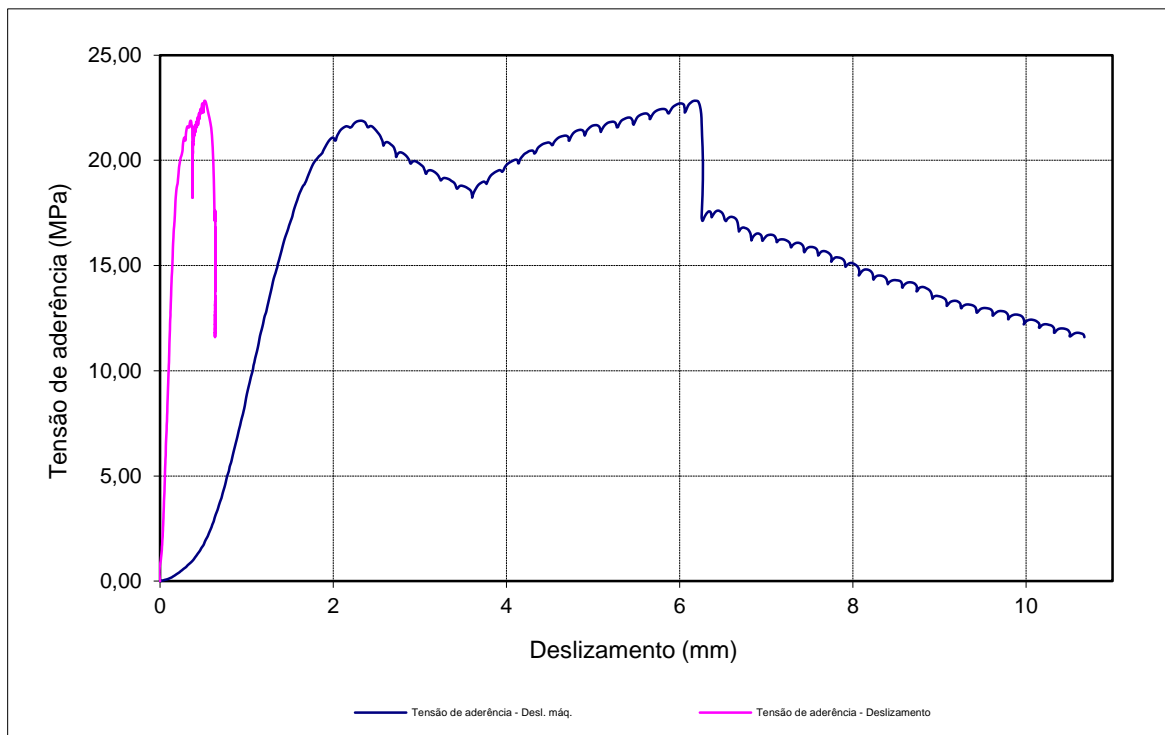
Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	16
fr, média	0,081

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	68
fc [MPa]	57,1

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
0,97	9,92	---	5,45	21,88

\* valores condicionados pela encurvadura do varão

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	10,68
Média dos dois CDP's	0,64



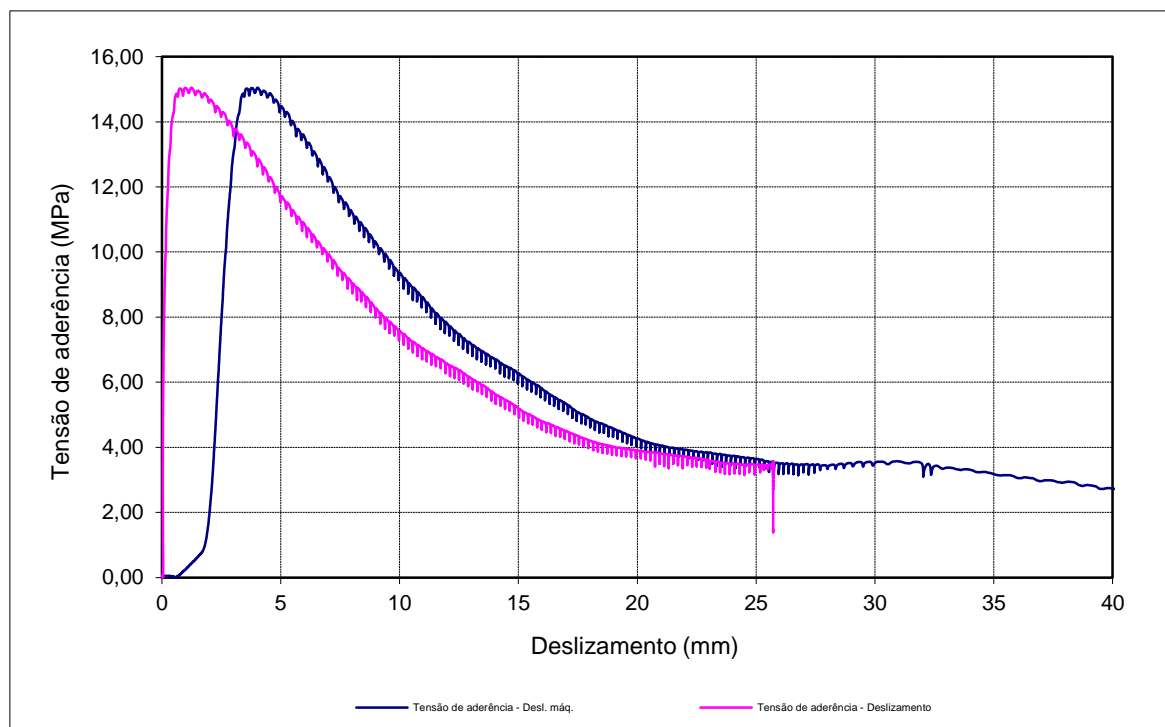
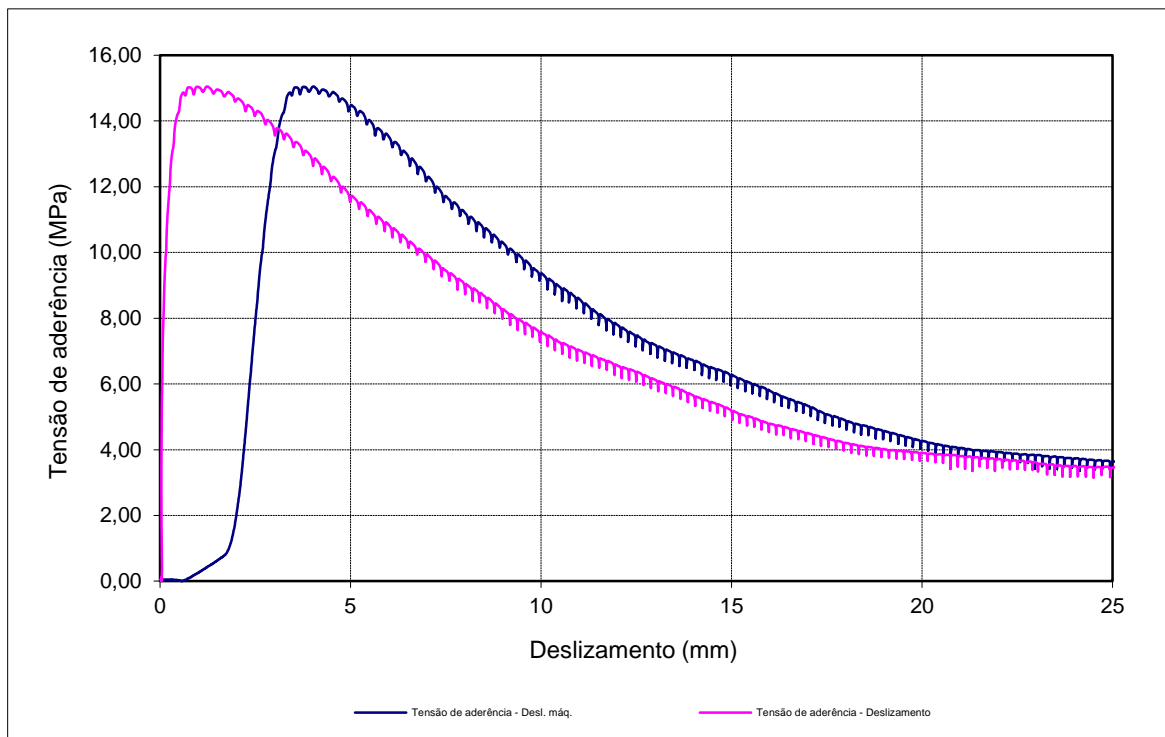


Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	16
fr, média	0,081

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
1,85	8,34	15,04	8,41	15,04

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	45
fc [MPa]	45,2

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	40,32
Média dos dois CDP's	25,72

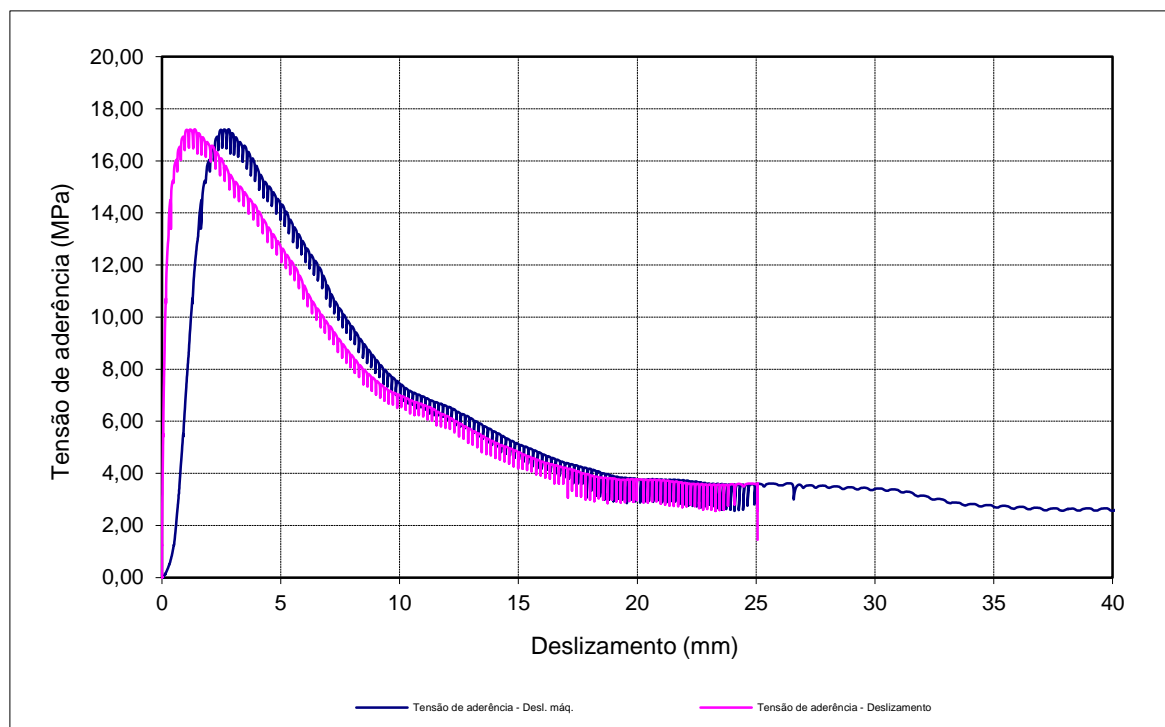
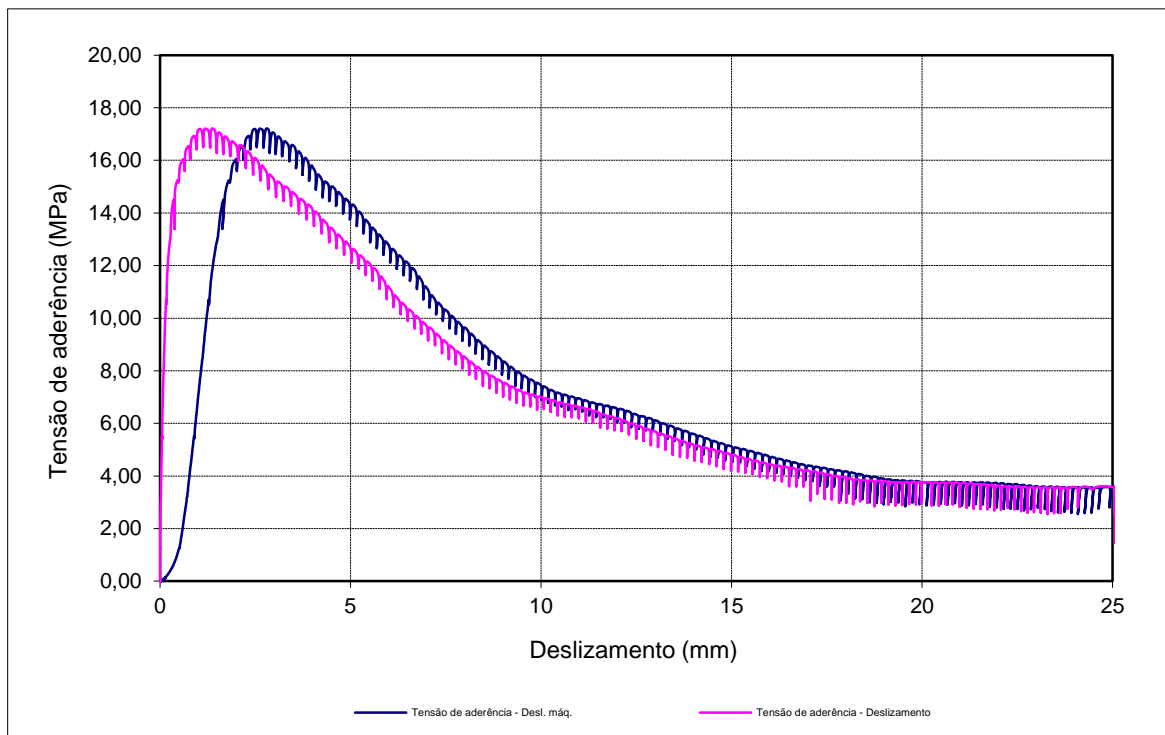


Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	16
fr, média	0,081

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
2,12	8,19	17,13	9,14	17,21

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	45
fc [MPa]	45,2

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	40,43
Média dos dois CDP's	25,06

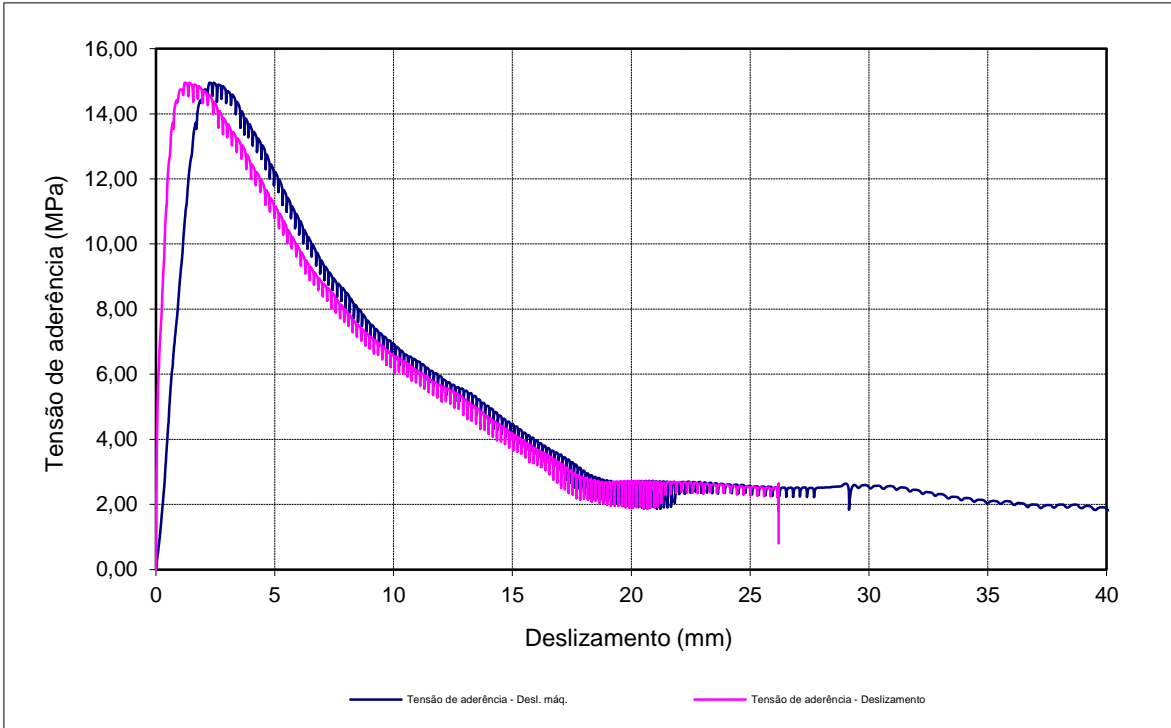
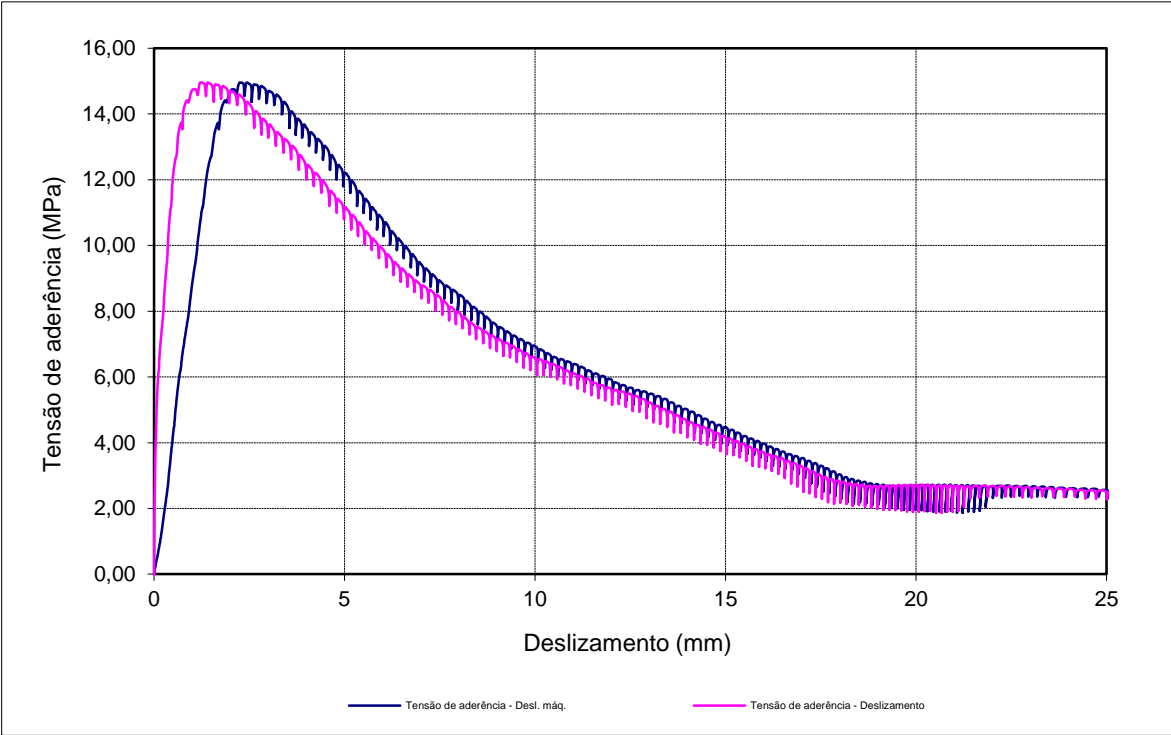


Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	16
fr, média	0,081

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	45
fc [MPa]	45,2

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
1,76	5,79	14,71	7,42	14,95

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	40,34
Média dos dois CDP's	26,20

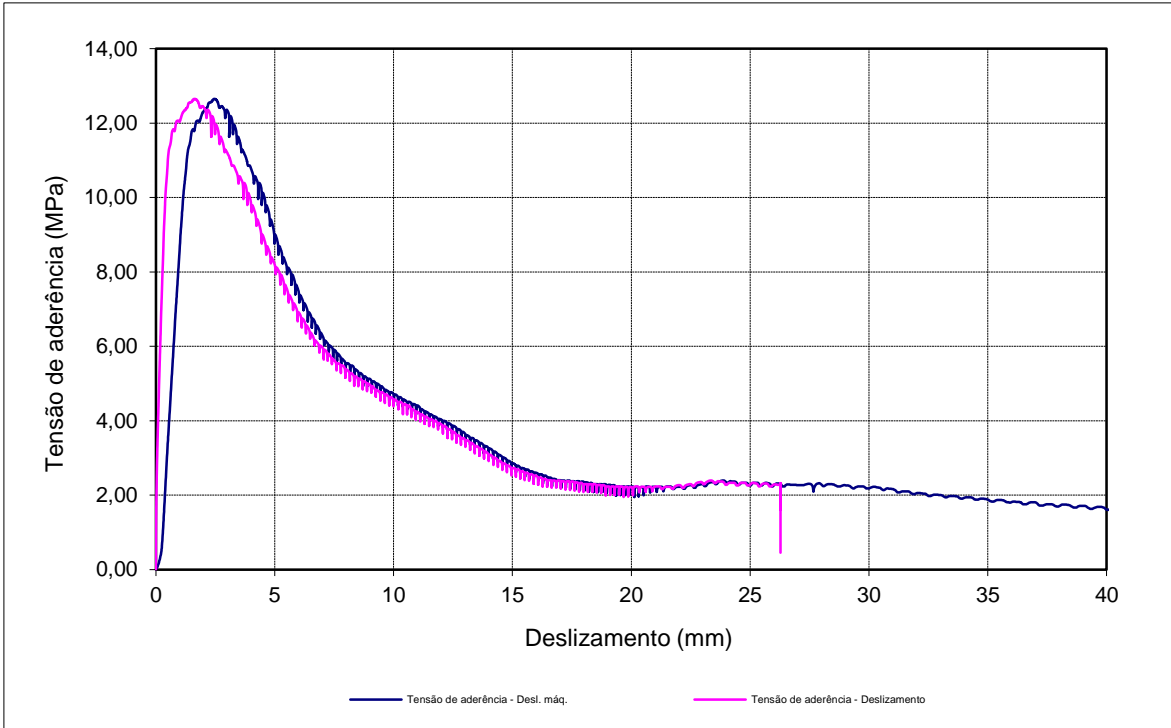
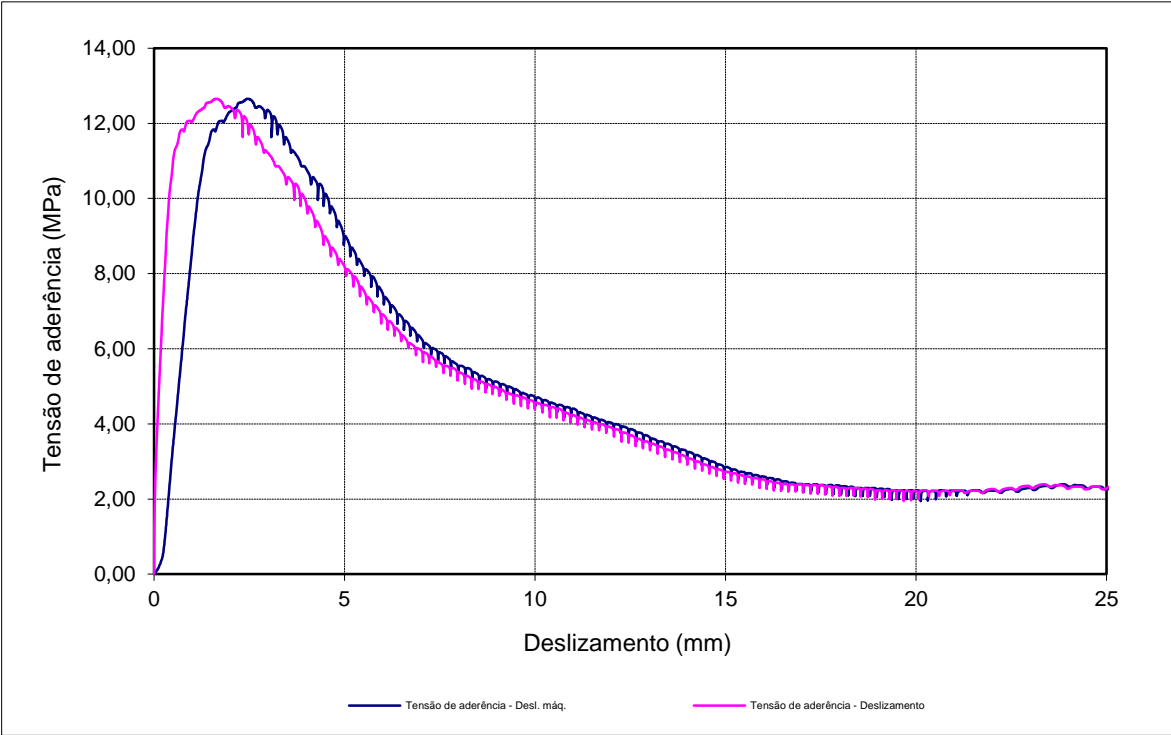


Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	16
fr, média	0,099

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	45
fc [MPa]	39,4

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
1,39	4,23	12,04	5,89	12,65

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	40,32
Média dos dois CDP's	26,28

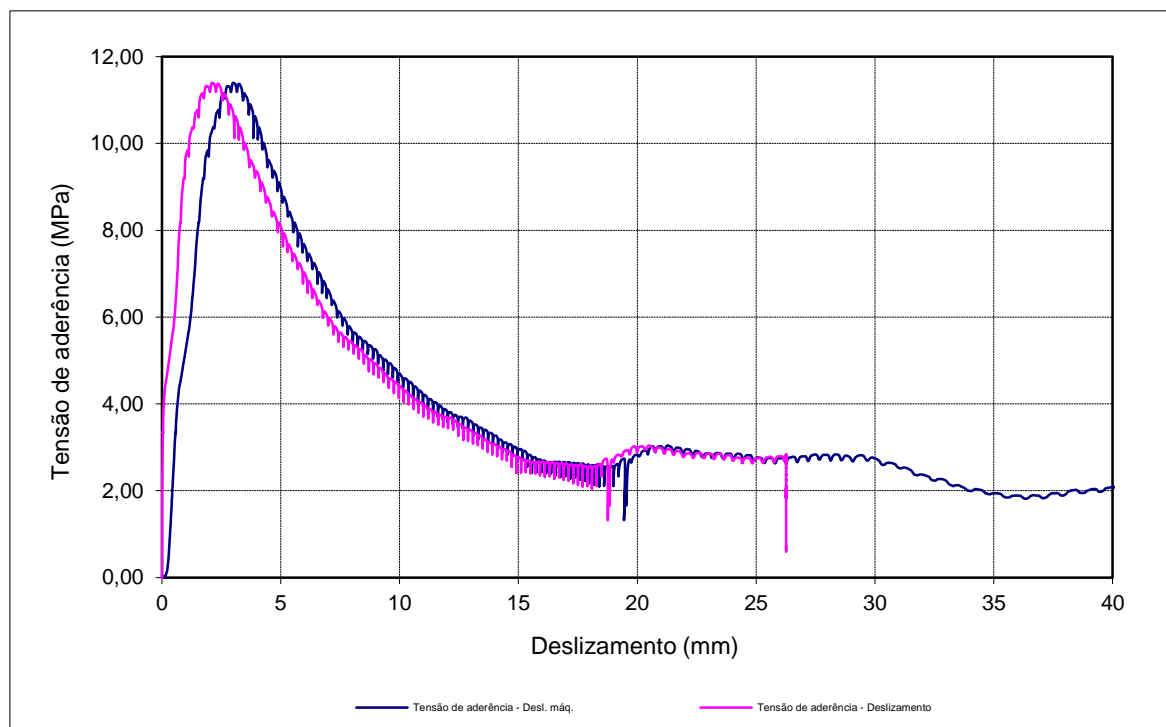
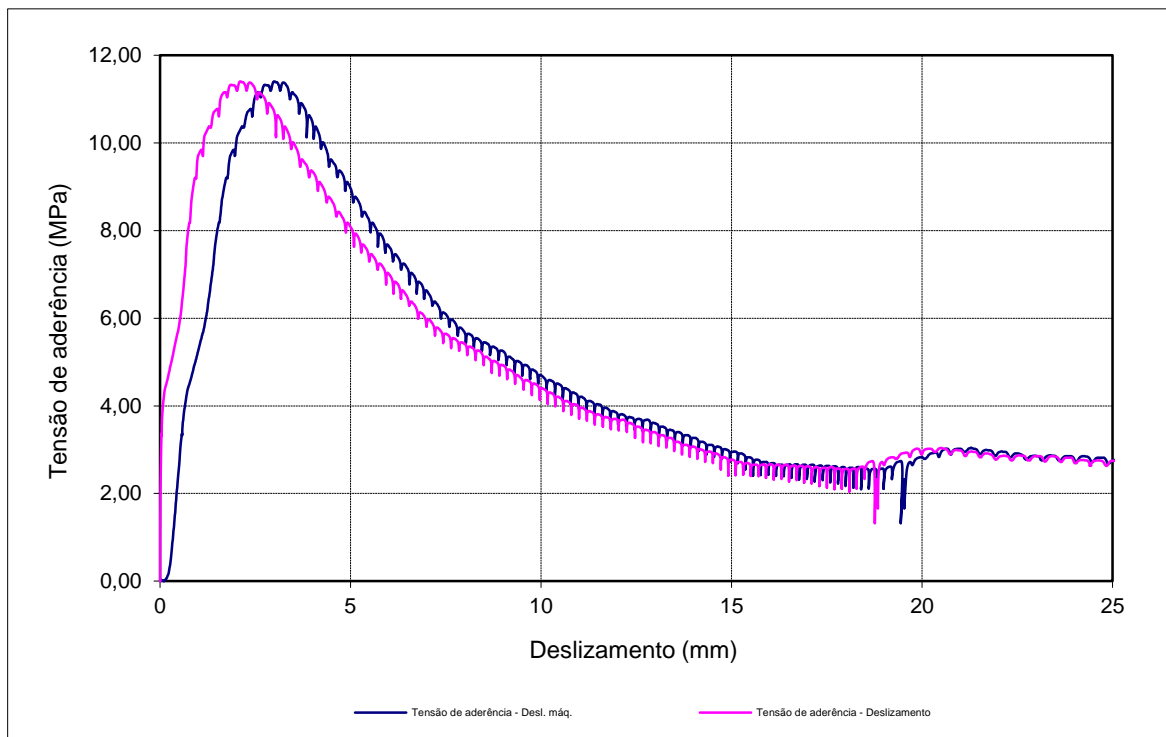


Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	16
fr, média	0,099

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
1,71	4,17	9,67	5,19	11,40

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	45
fc [MPa]	39,4

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	40,38
Média dos dois CDP's	26,26

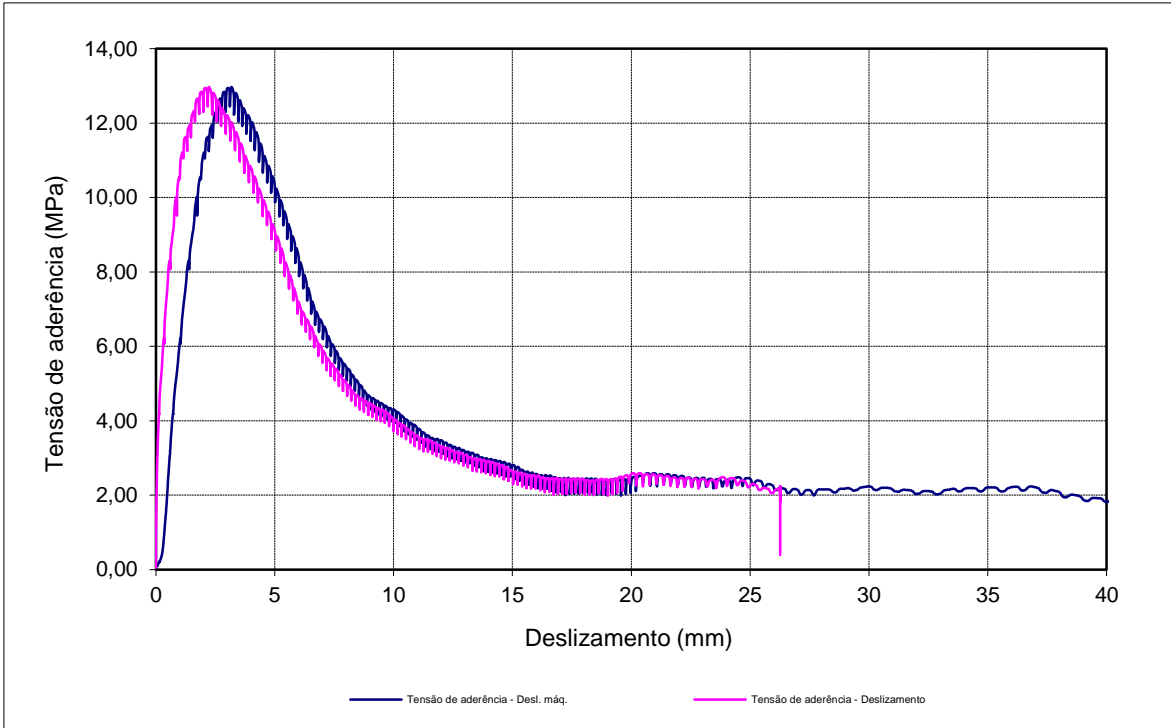
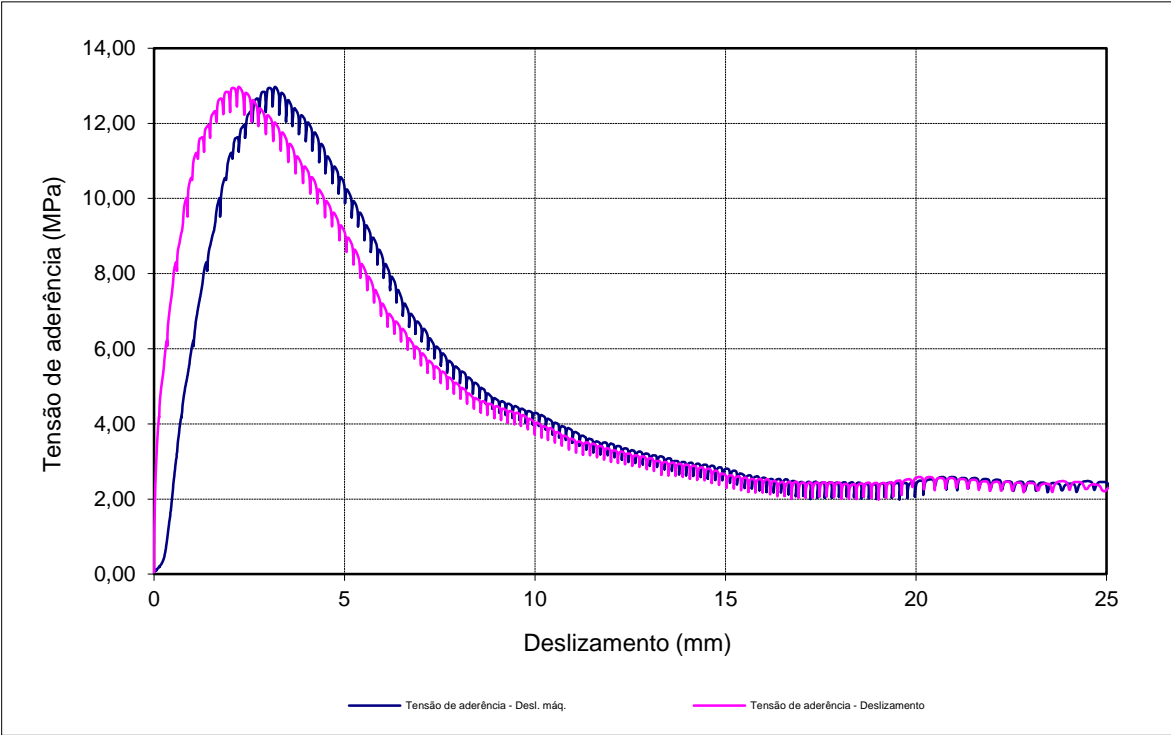


Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	16
fr, média	0,099

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	45
fc [MPa]	39,4

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
1,18	3,77	10,49	5,15	12,97

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	40,30
Média dos dois CDP's	26,27

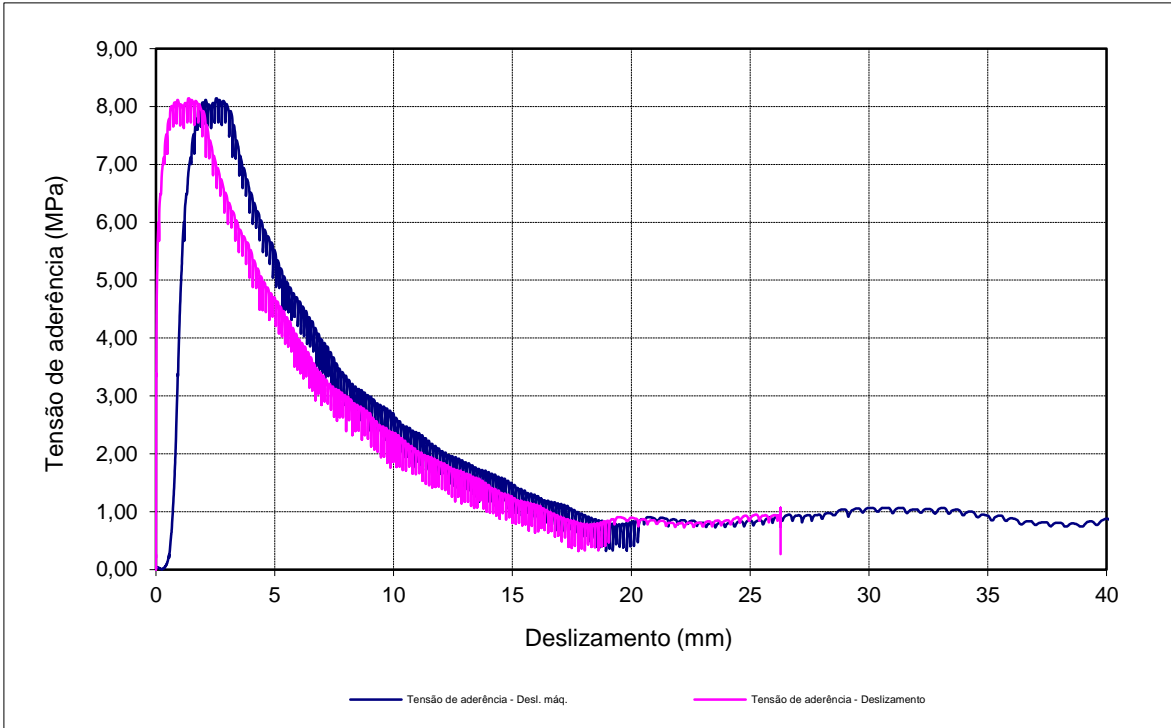
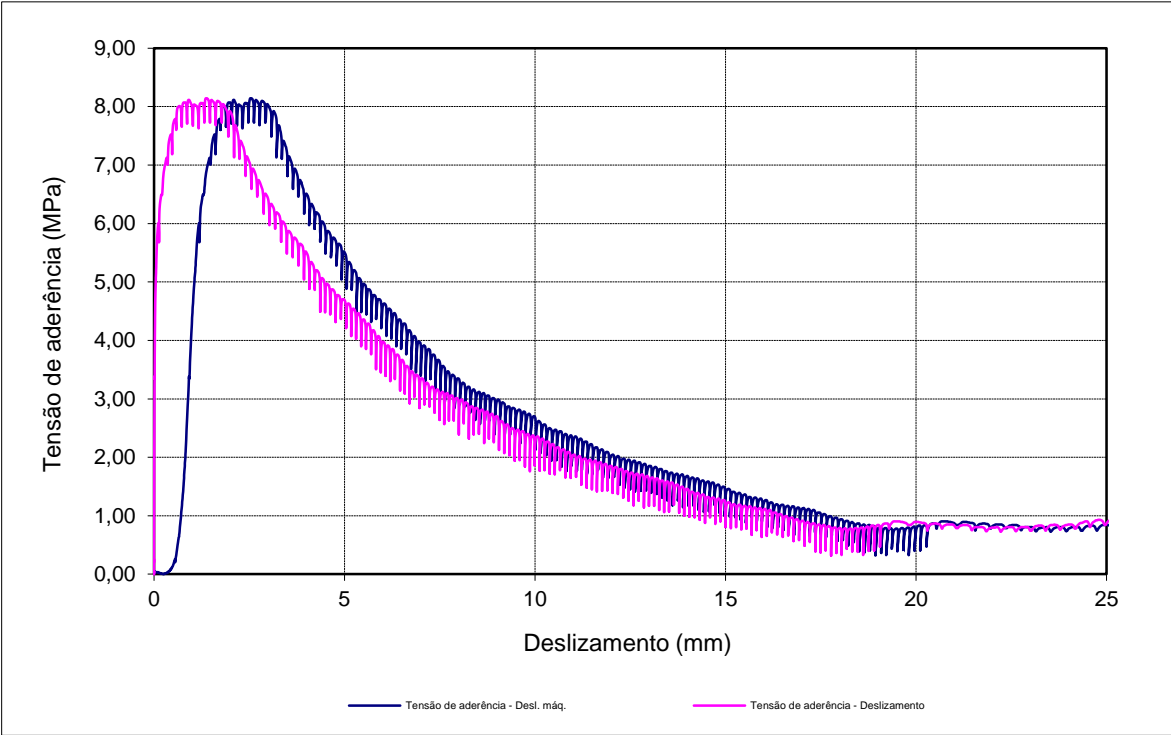


Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	16
fr, média	0,098

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	45
fc [MPa]	39,4

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
2,47	5,87	7,96	5,44	8,14

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	40,36
Média dos dois CDP's	26,28

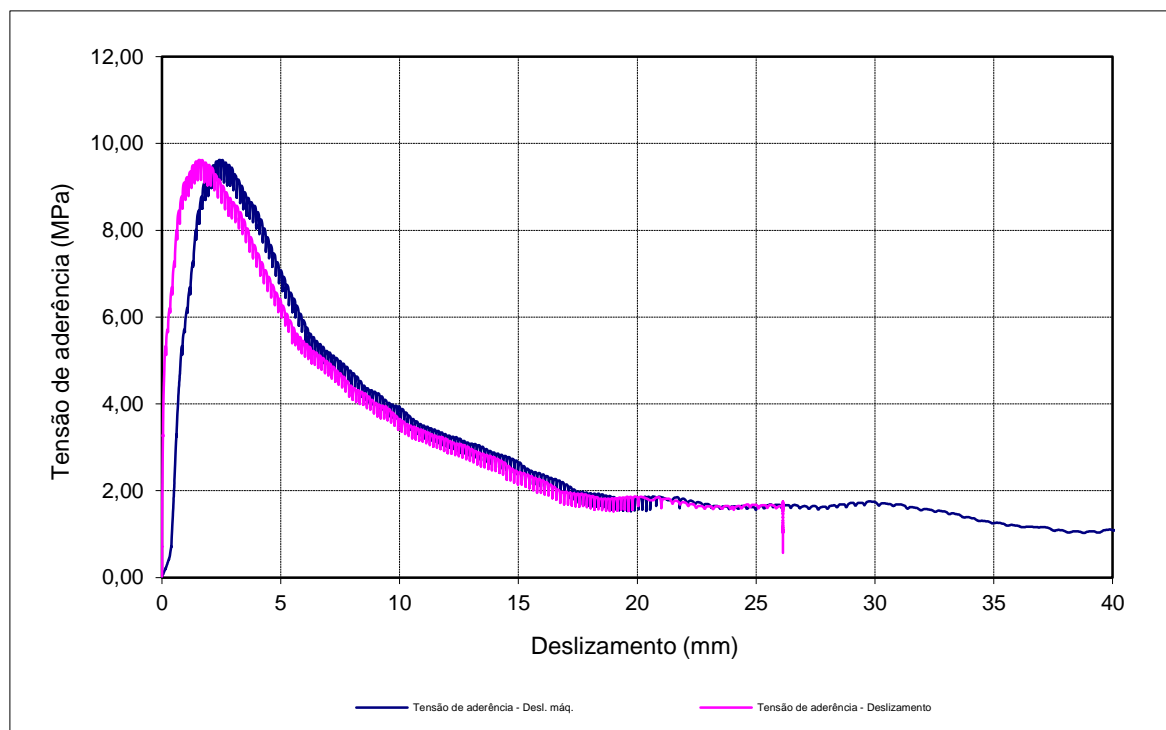
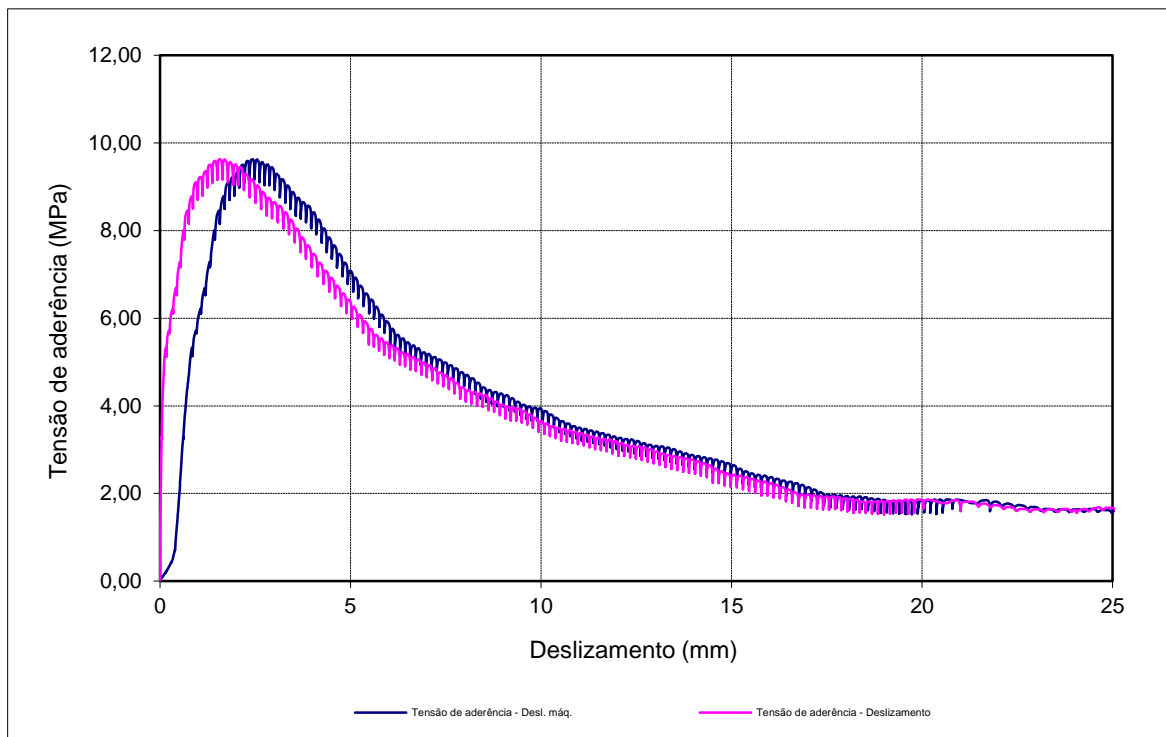


Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	16
fr, média	0,098

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
1,33	4,73	8,97	5,01	9,62

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	45
fc [MPa]	39,4

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	40,34
Média dos dois CDP's	26,13





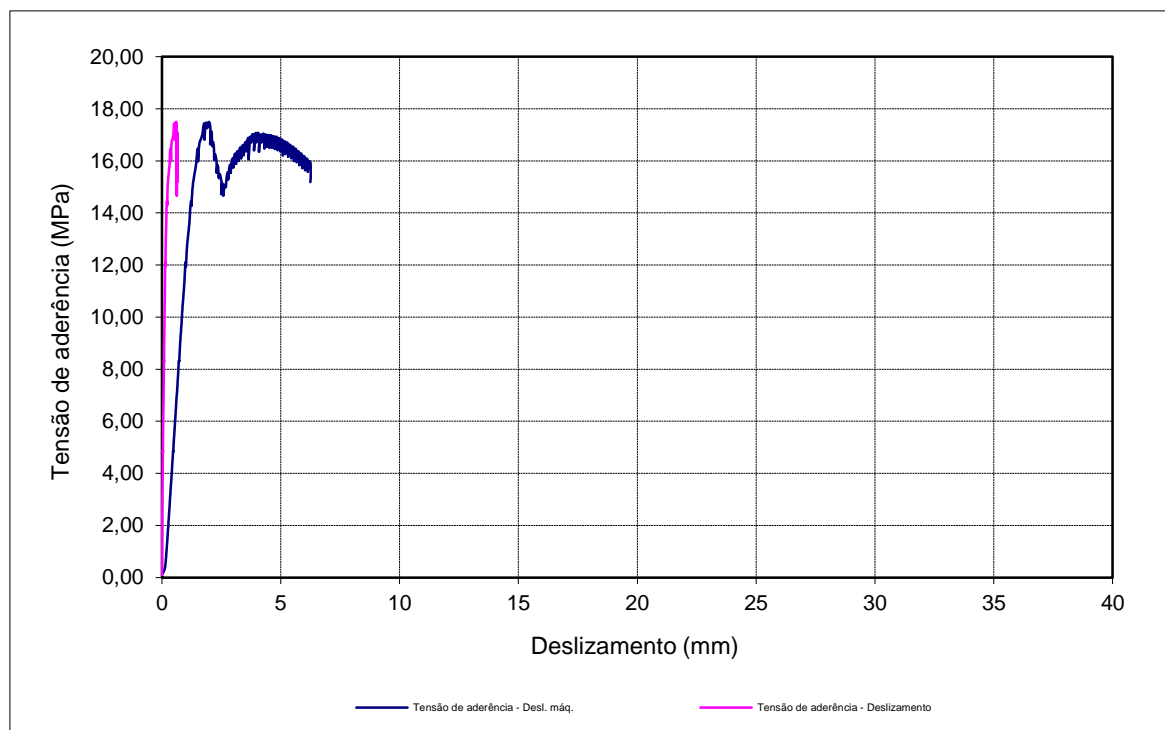
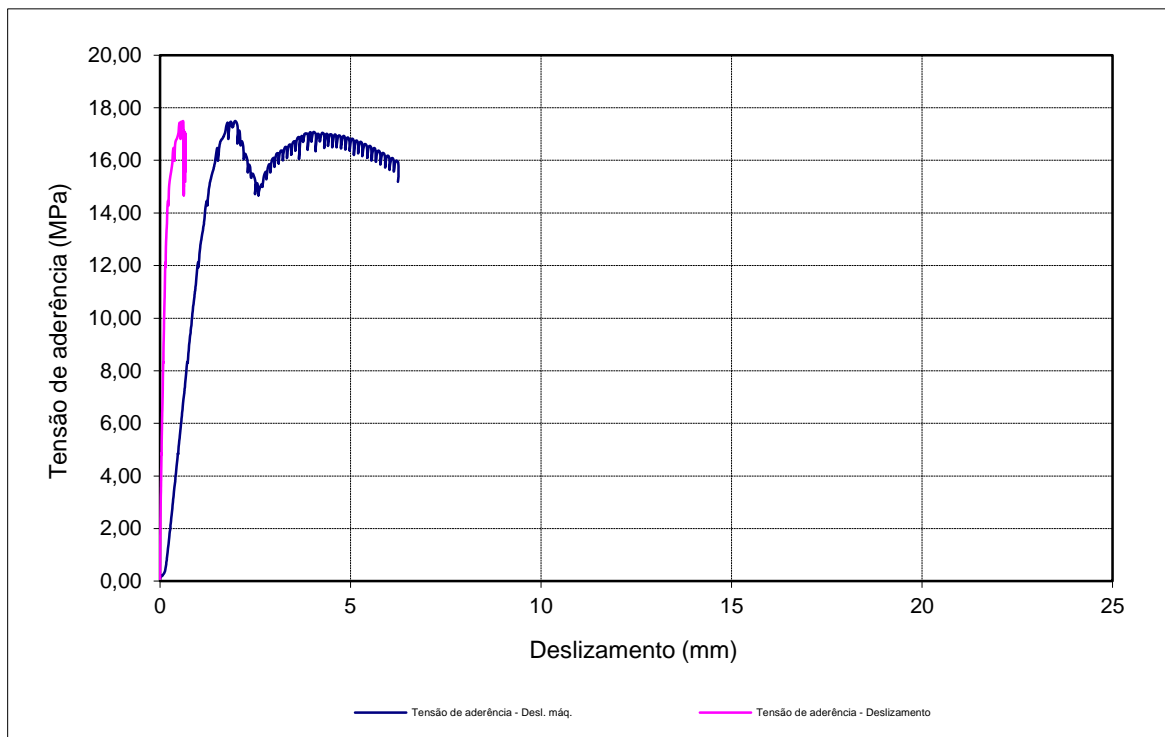
Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	16
fr, média	0,098

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	45
fc [MPa]	39,4

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
1,79	9,34	---	5,56	17,50

\* valores condicionados pela encurvadura do varão

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	6,26
Média dos dois CDP's	0,66

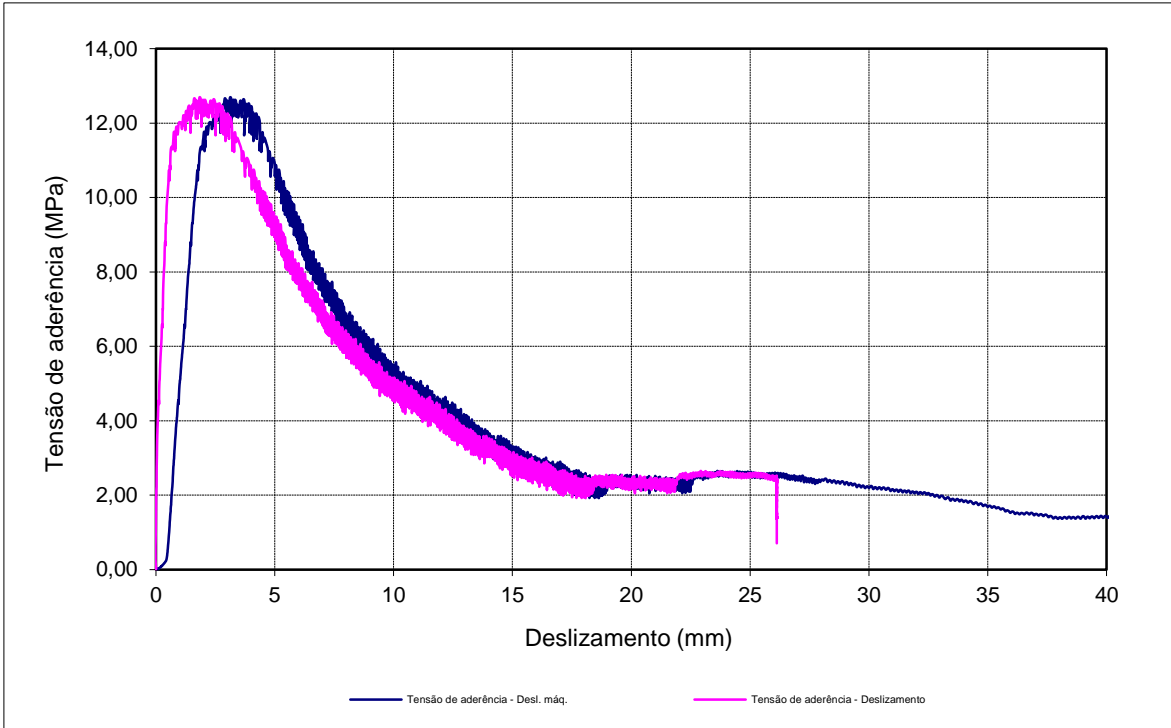
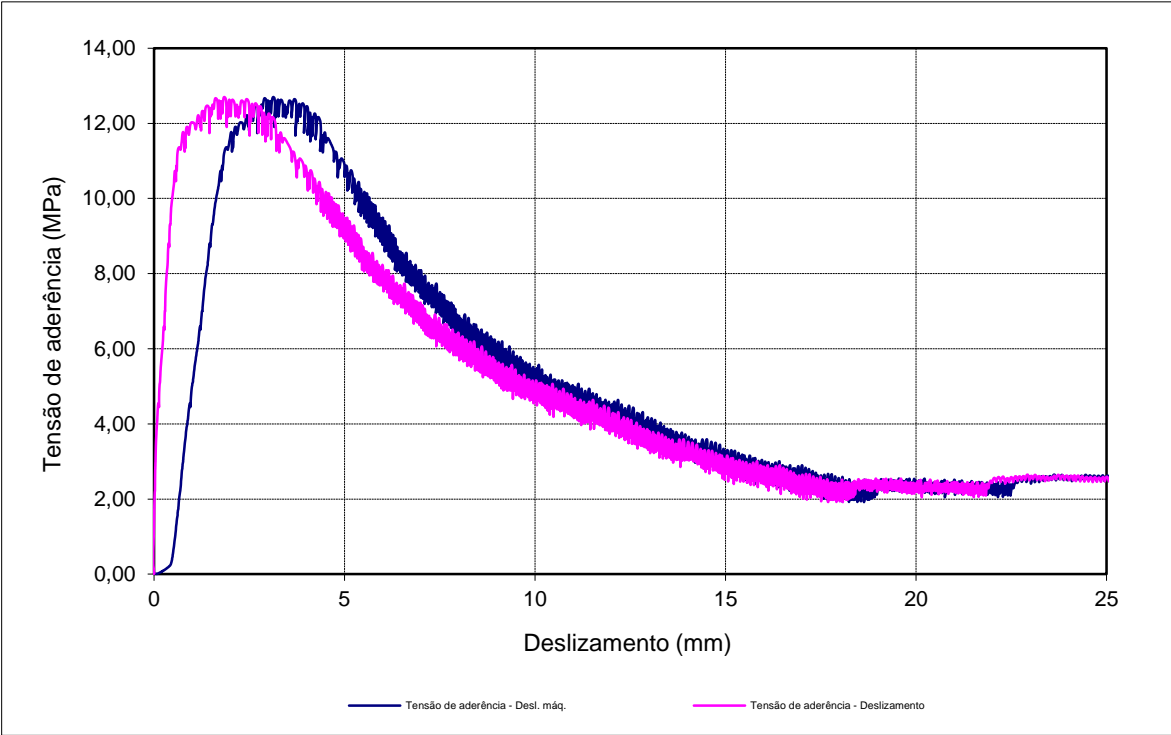


Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	16
fr, média	0,098

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	45
fc [MPa]	39,4

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
1,82	4,29	12,03	6,05	12,70

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	40,34
Média dos dois CDP's	26,12

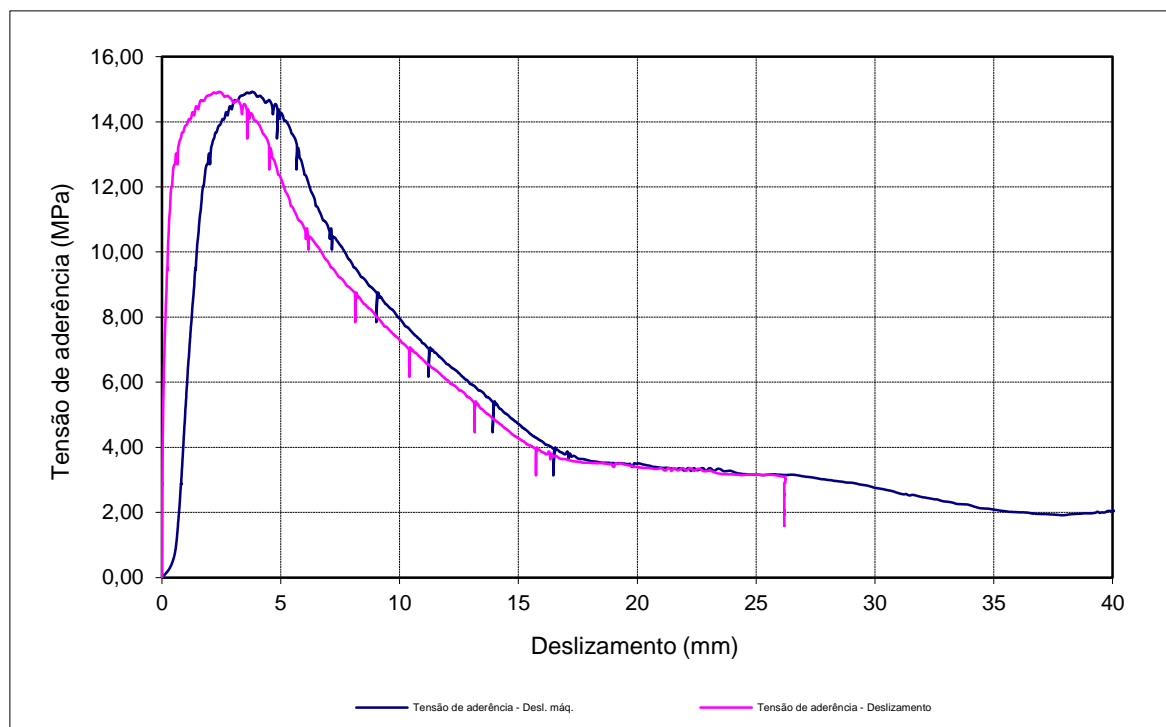
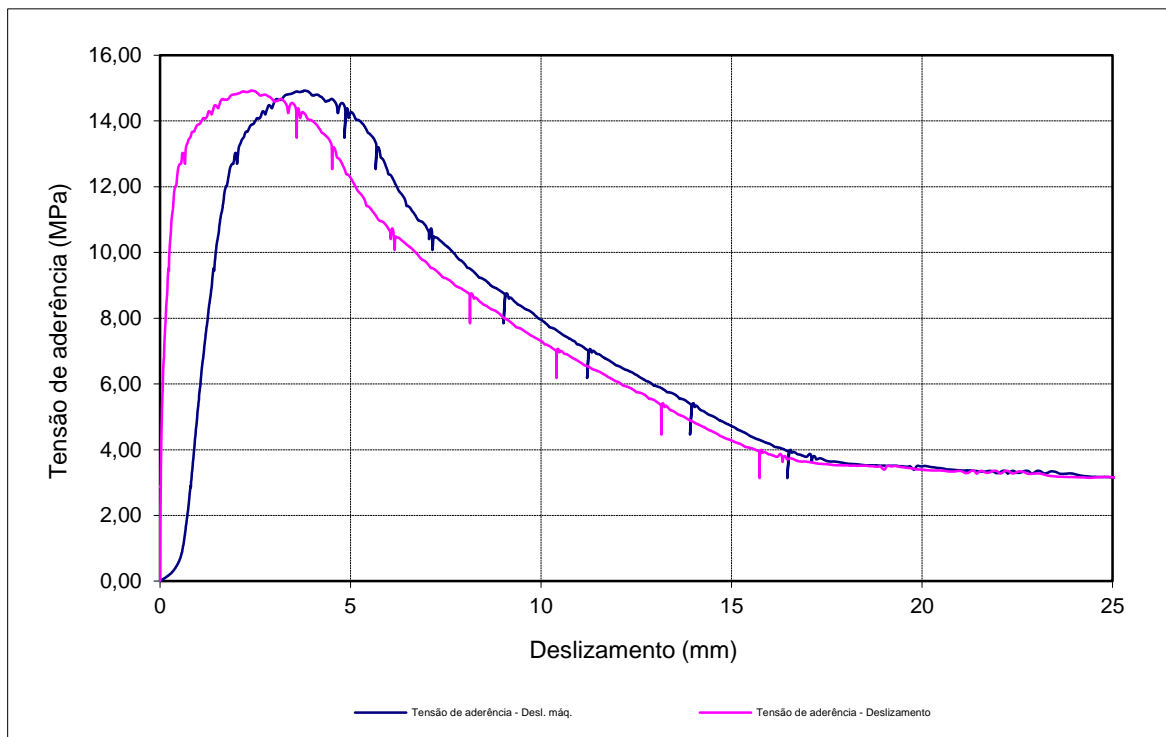


Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	16
fr, média	0,098

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
2,07	6,76	13,88	7,57	14,92

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	45
fc [MPa]	39,4

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	40,27
Média dos dois CDP's	26,23

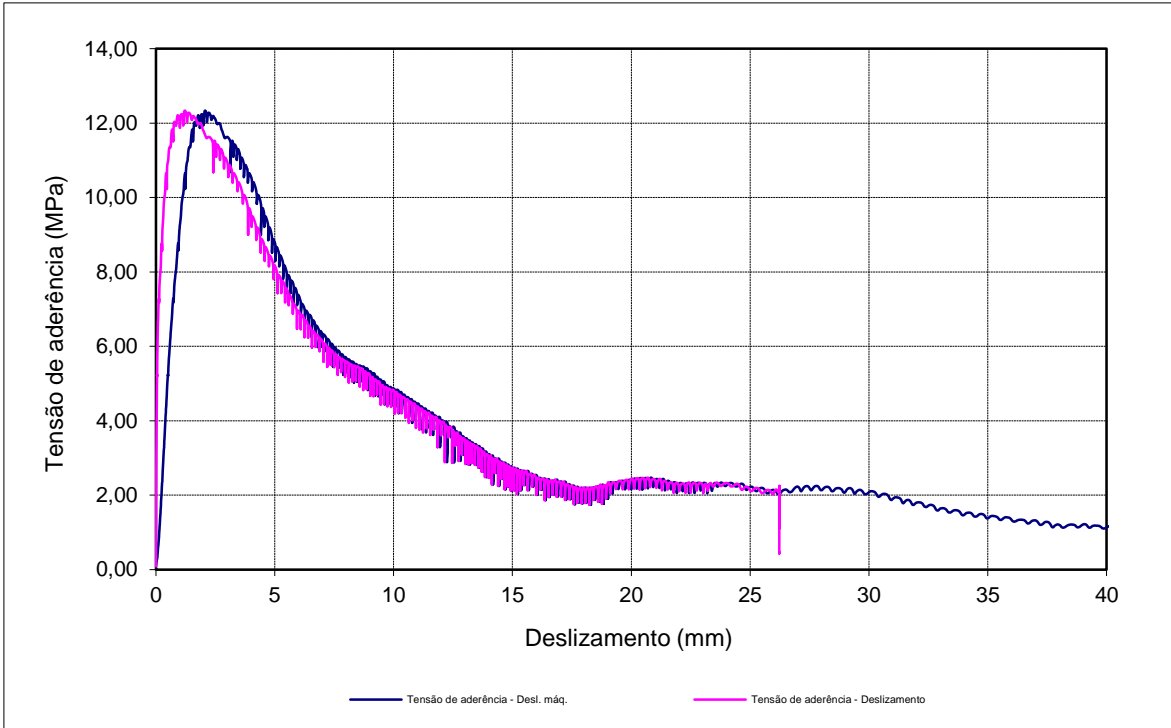
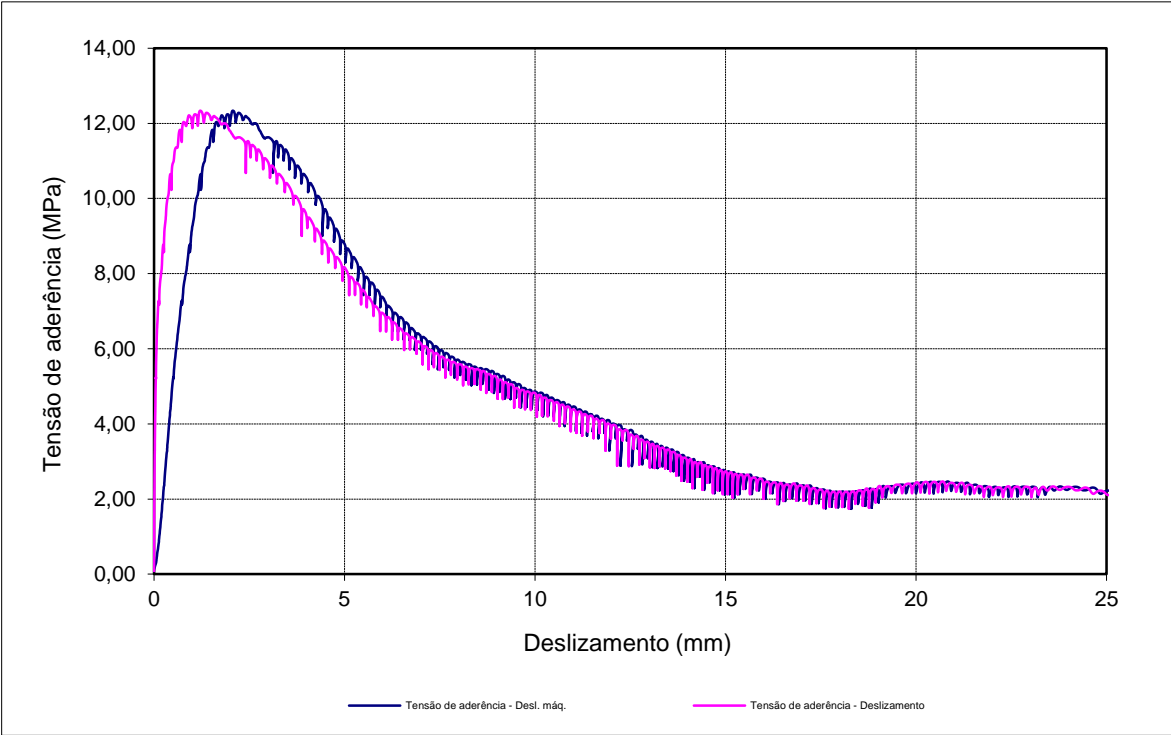


Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	16
fr, média	0,098

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	45
fc [MPa]	39,4

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
1,97	6,91	11,95	6,94	12,34

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	40,31
Média dos dois CDP's	26,23

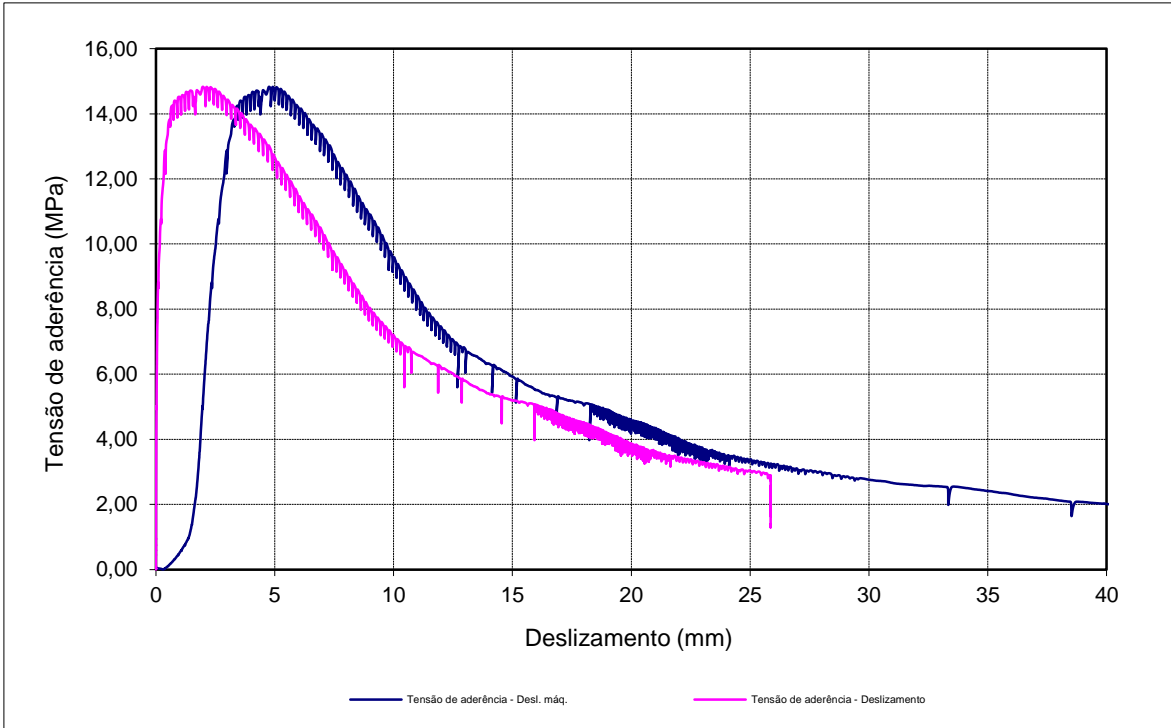
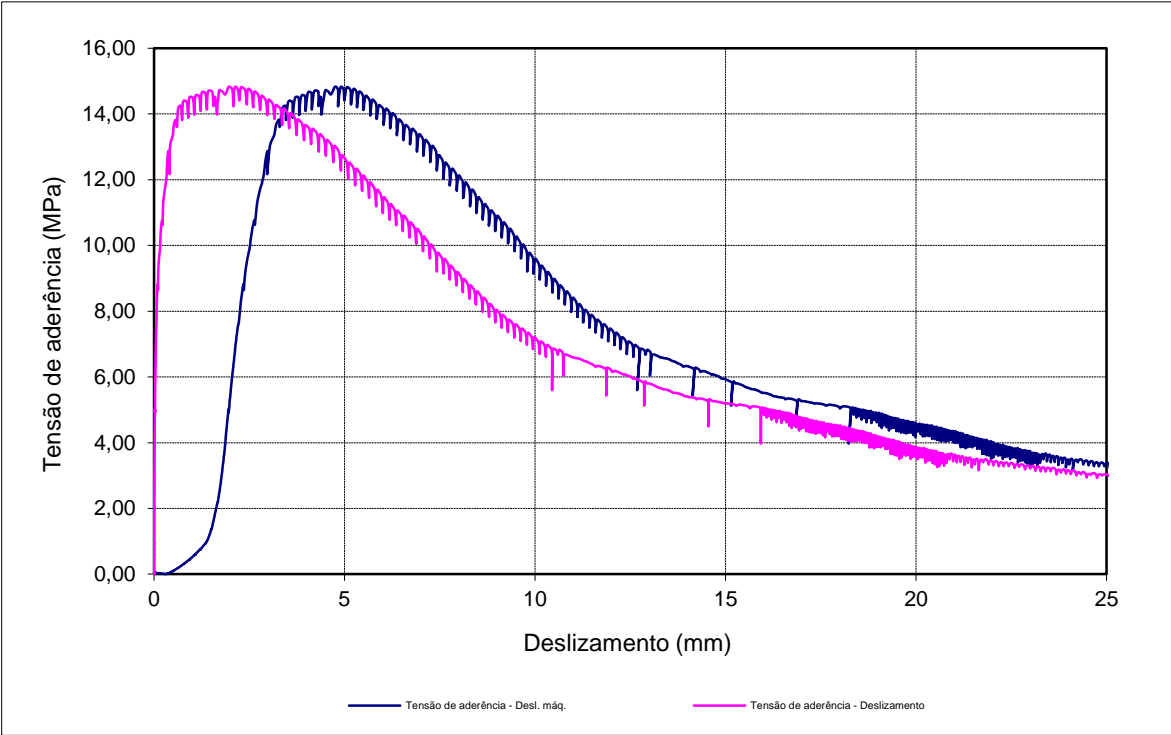


Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	25
fr, média	0,097

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
2,86	8,79	14,52	8,72	14,83

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	45
fc [MPa]	39,4

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	40,27
Média dos dois CDP's	25,86

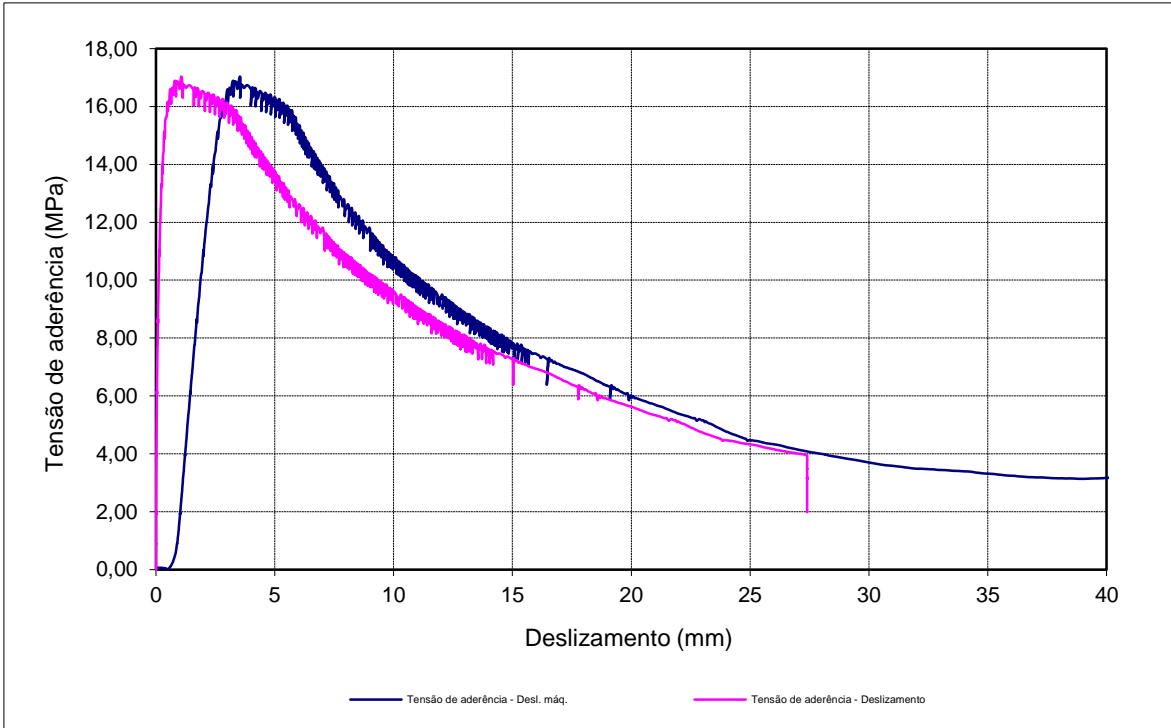
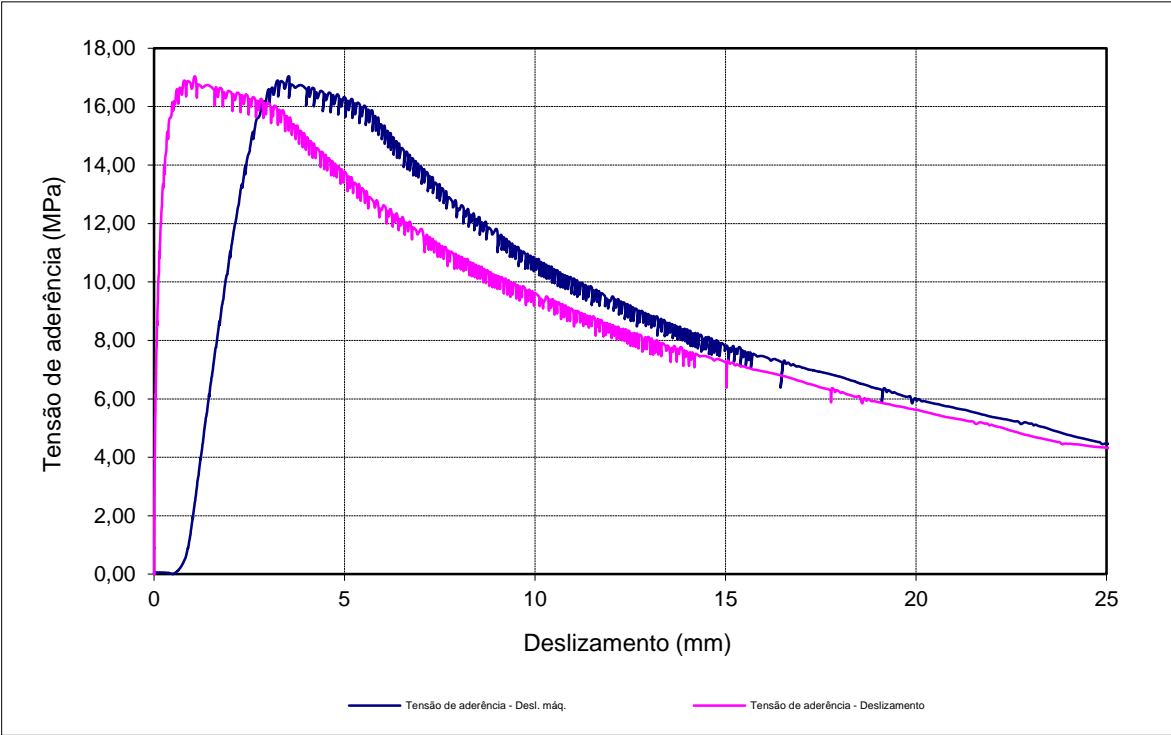


Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	25
fr, média	0,097

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
2,29	9,28	16,62	9,40	17,03

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	45
fc [MPa]	39,4

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	41,12
Média dos dois CDP's	27,40

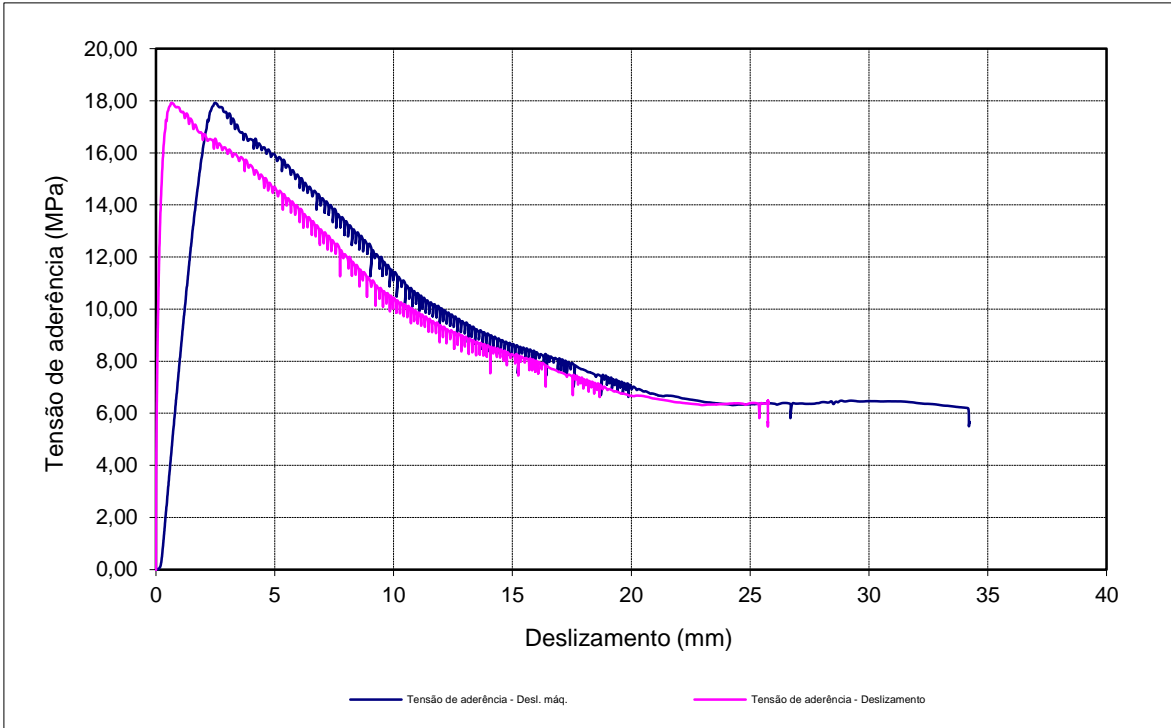
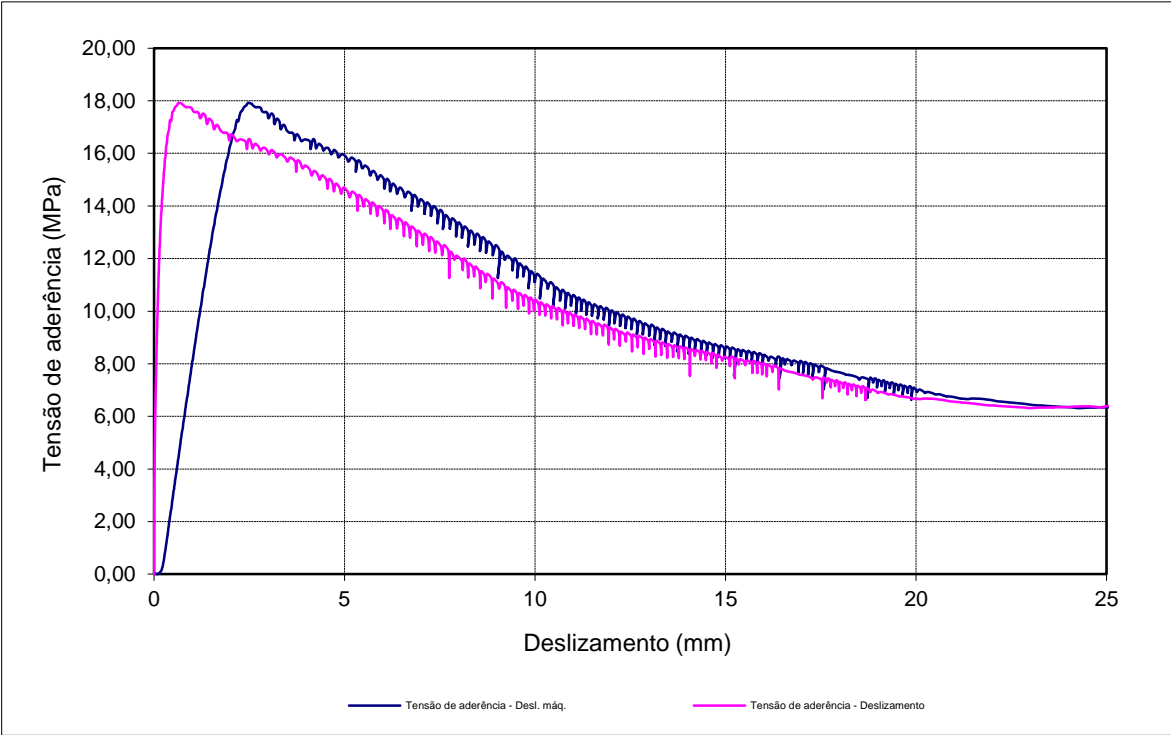


Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	25
fr, média	0,097

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	45
fc [MPa]	39,4

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
3,51	10,31	17,70	10,51	17,92

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	34,23
Média dos dois CDP's	25,75



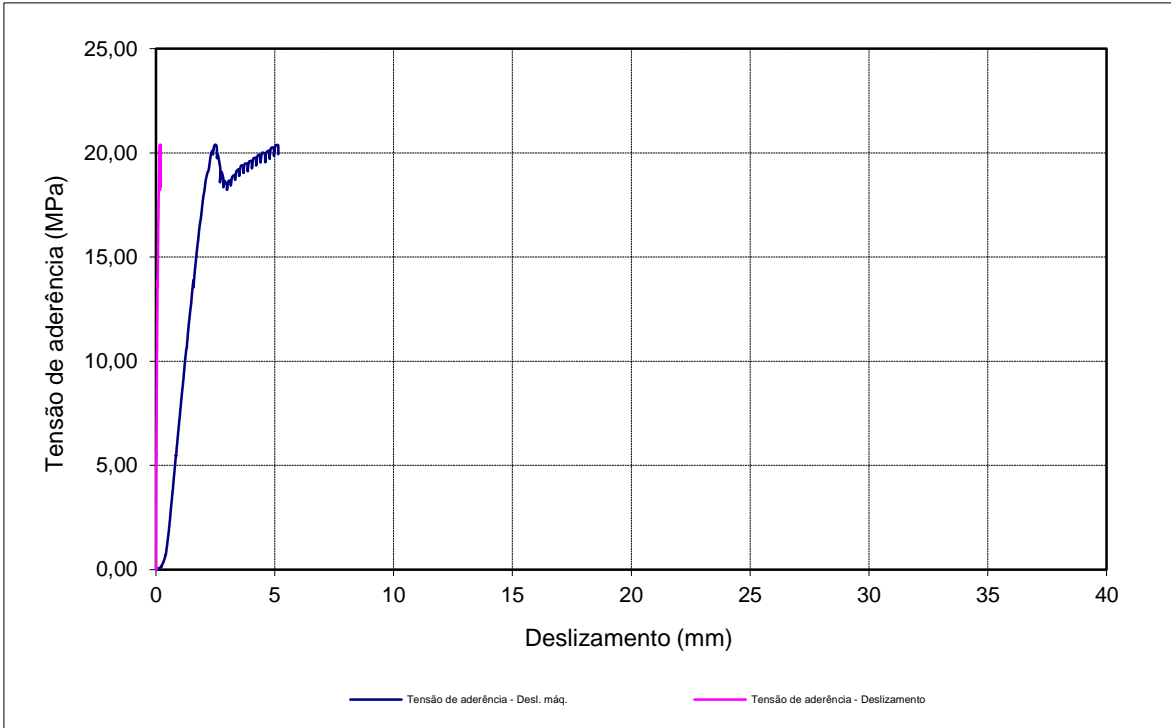
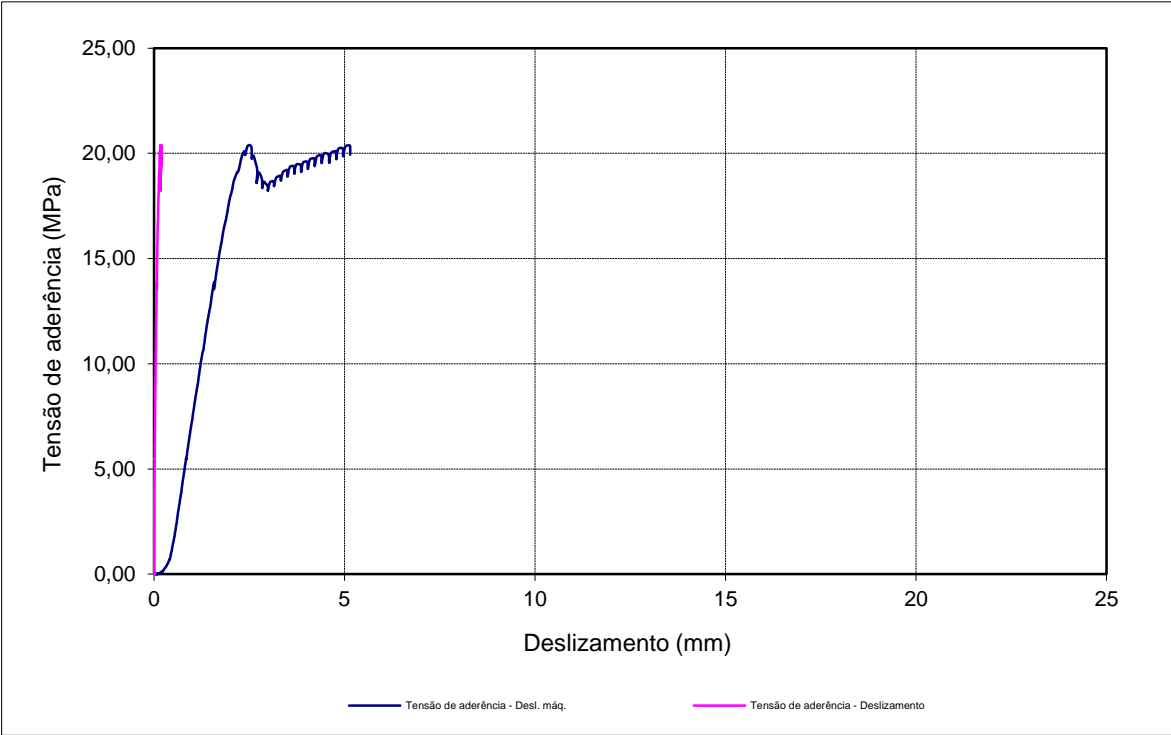
Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	25
fr, média	0,097

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	68
fc [MPa]	69,75

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
4,22	16,64	---	10,43	20,39

\* valores condicionados pela encurvadura do varão

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	5,15
Média dos dois CDP's	0,19





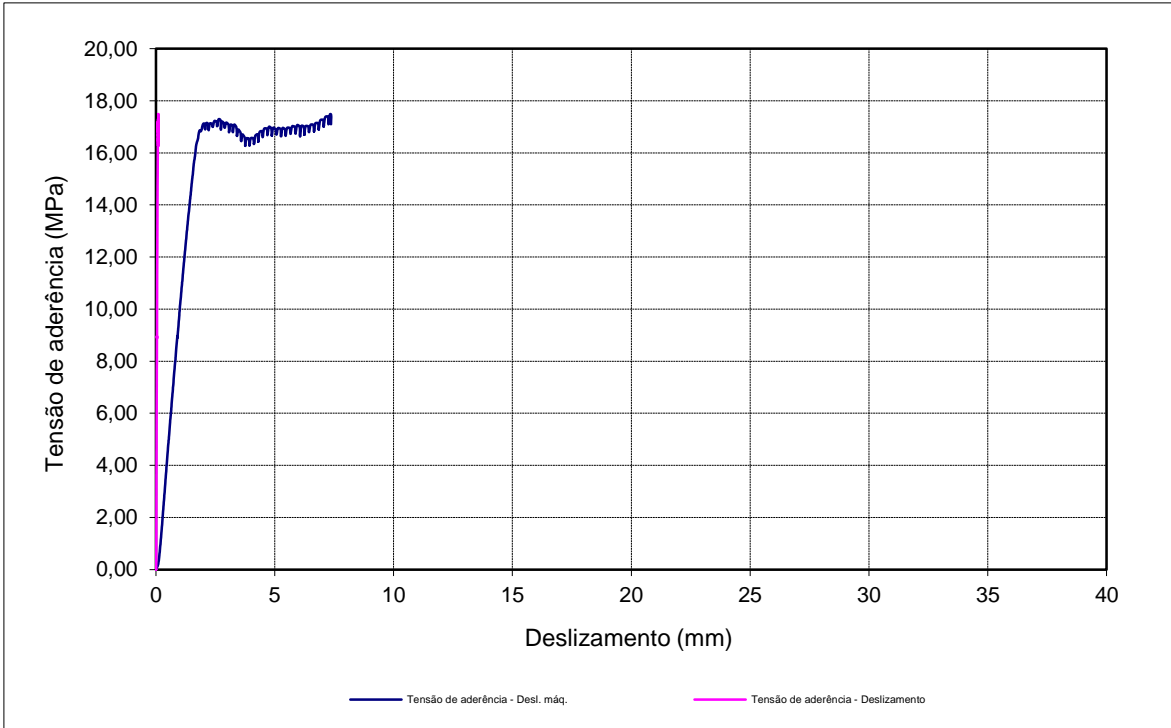
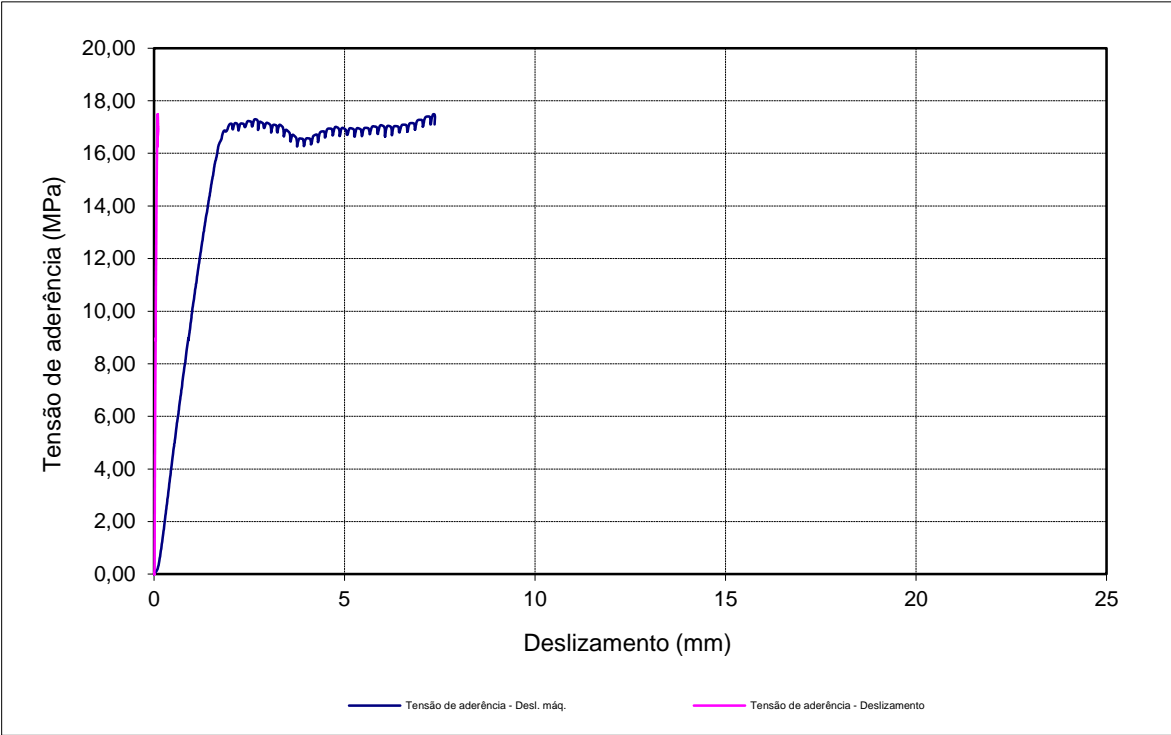
Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	25
fr, média	0,097

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	68
fc [MPa]	69,75

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
0,08	---	---	0,08	17,49

\* valores condicionados pela encurvadura do varão

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	7,38
Média dos dois CDP's	0,10



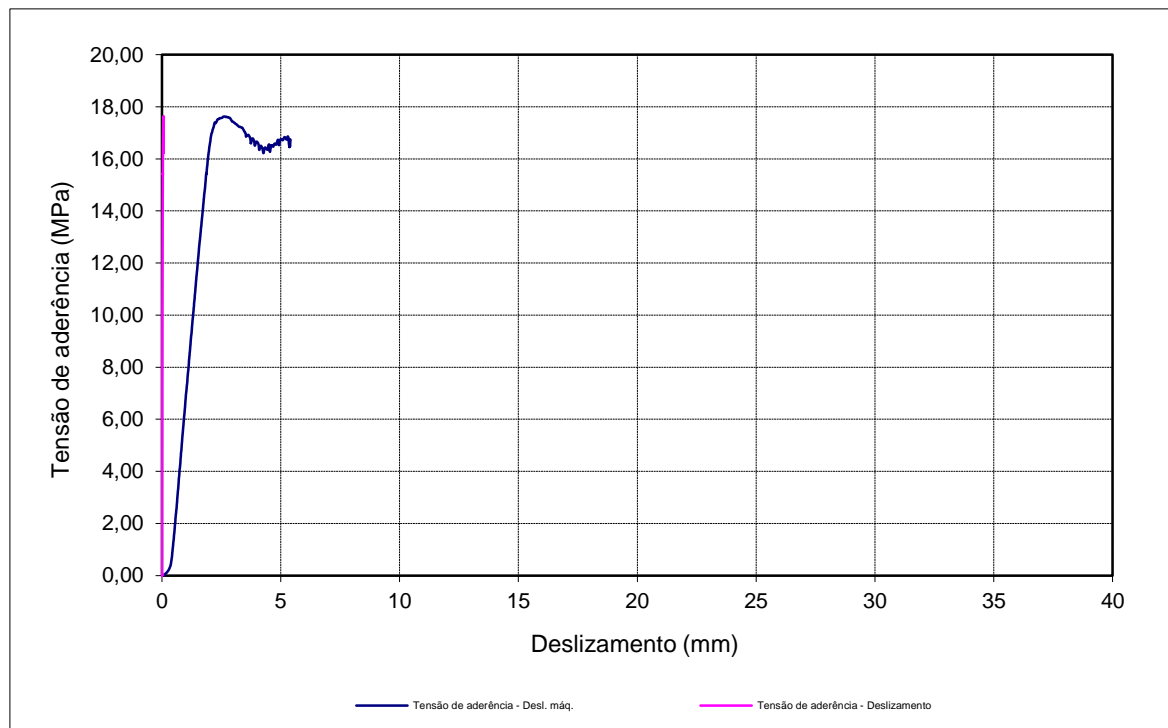
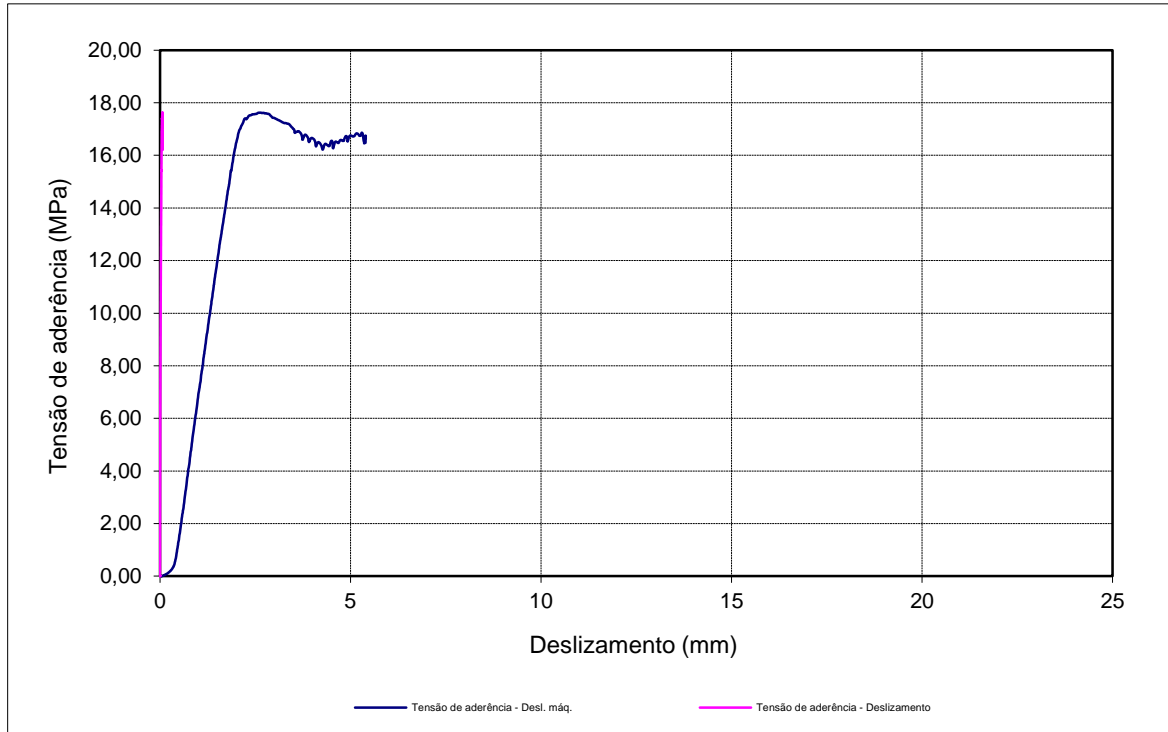
Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	25
fr, média	0,097

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	68
fc [MPa]	69,75

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
7,48	---	---	7,48	17,62

\* valores condicionados pela encurvadura do varão

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	5,40
Média dos dois CDP's	0,07

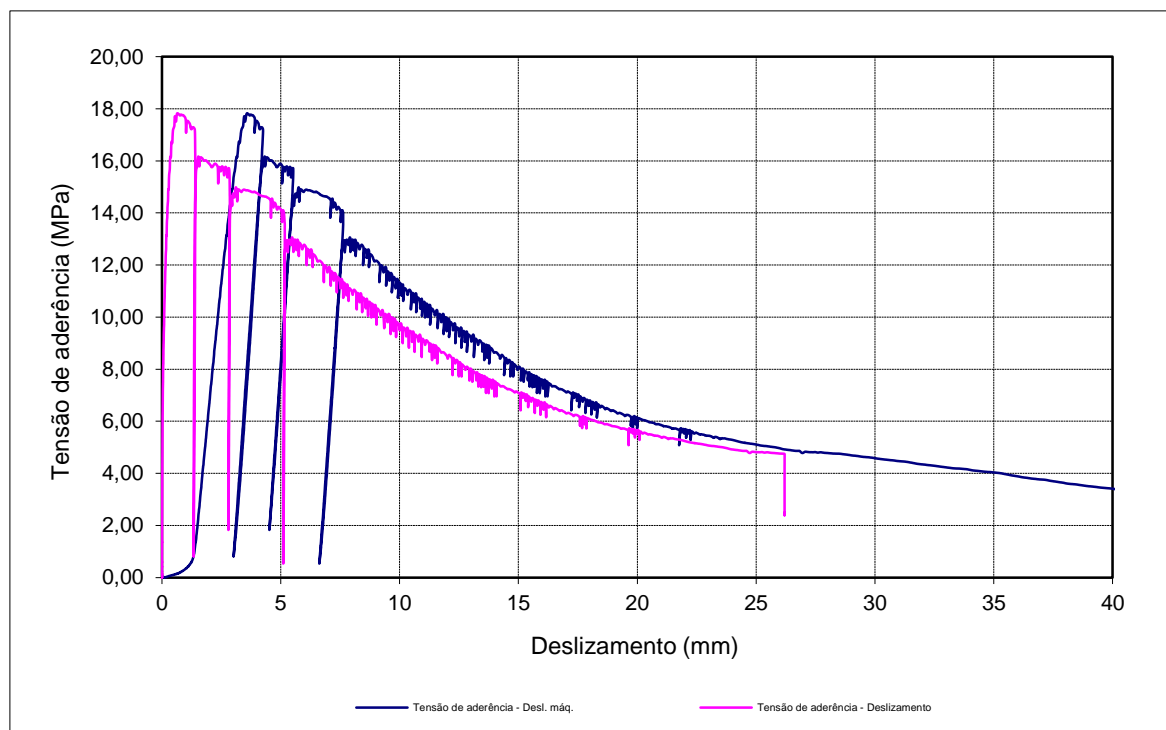
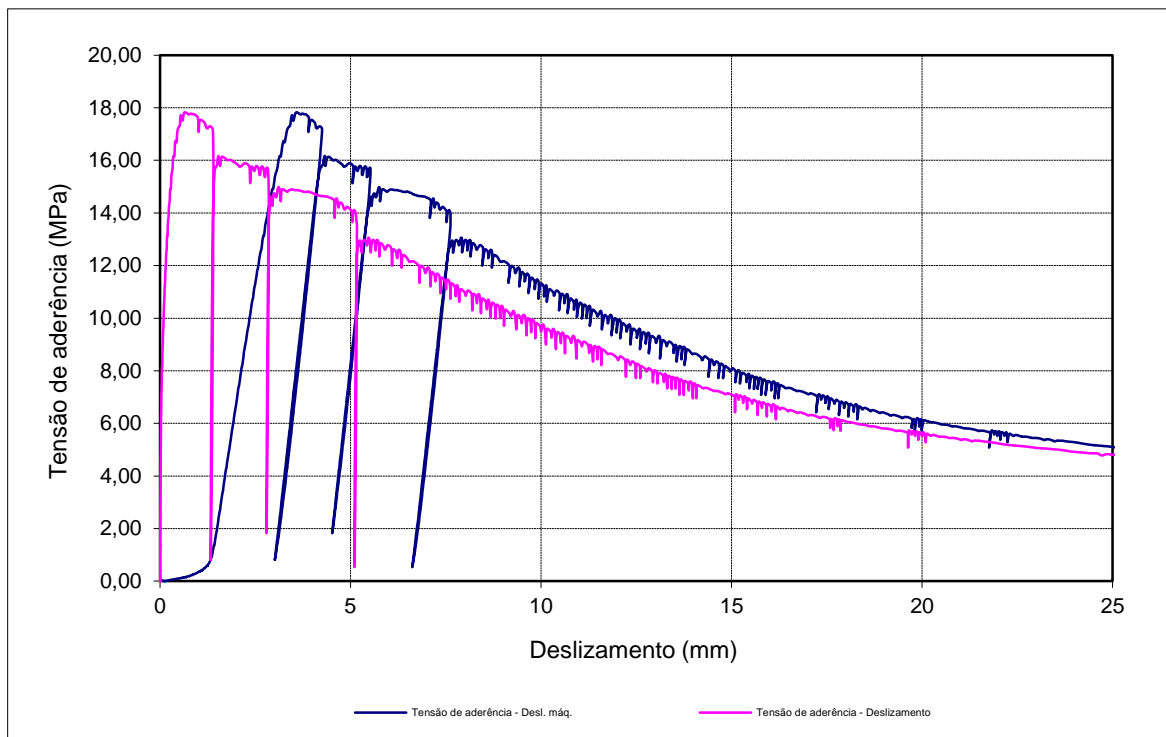


Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	25
fr, média	0,101

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
2,47	10,20	17,60	10,09	17,83

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	45
fc [MPa]	39,4

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	40,32
Média dos dois CDP's	26,20

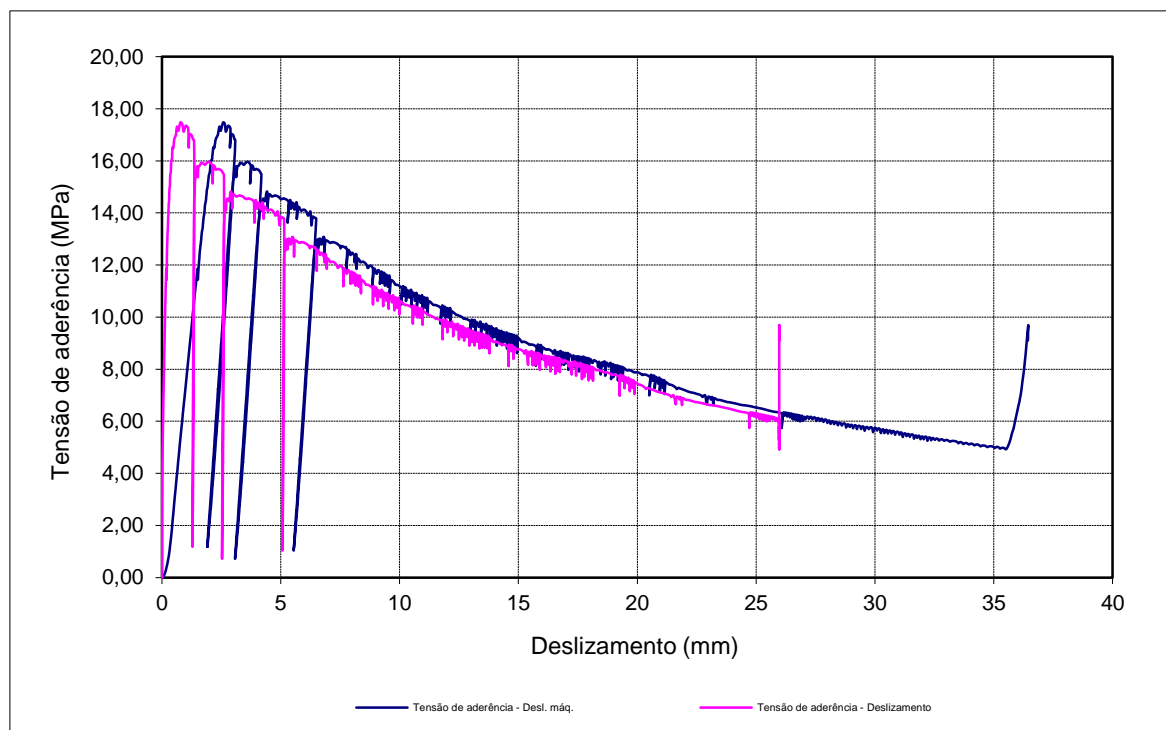
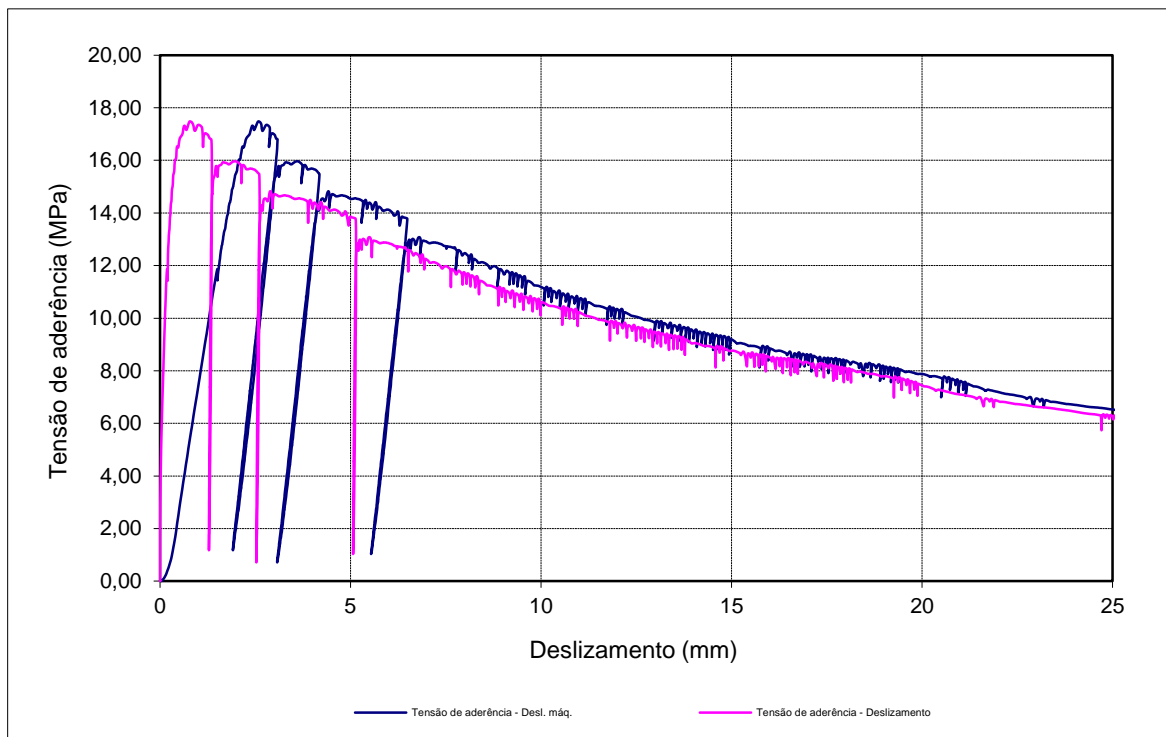


Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	25
fr, média	0,101

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
3,18	8,56	17,34	9,69	17,48

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	45
fc [MPa]	39,4

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	36,46
Média dos dois CDP's	25,97



**Propriedades do varão**

Aço	A500NR SD
d [mm]	25
fr, média	0,101

**Tensões de aderência**

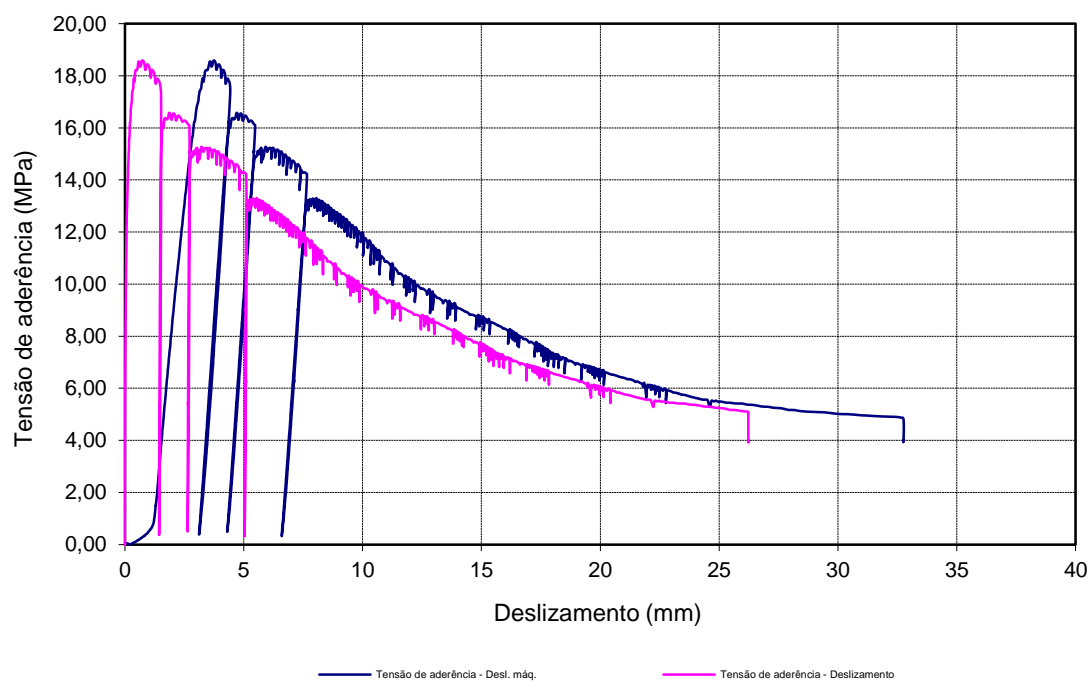
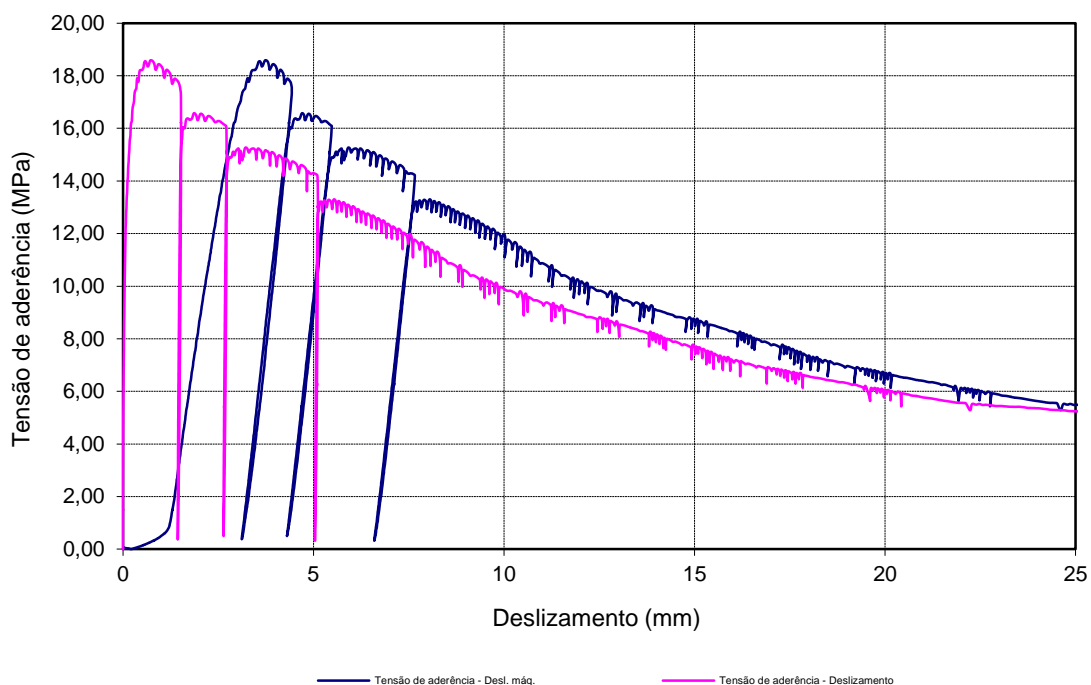
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
5,47	13,39	18,38	12,41	18,59

**Propriedades do betão**

Betão	C50/60
fcm [MPa]	45
fc [MPa]	39,4

**Deslocamentos Máximos**

Cabeçote da Máquina	32,77
Média dos dois CDP's	26,23



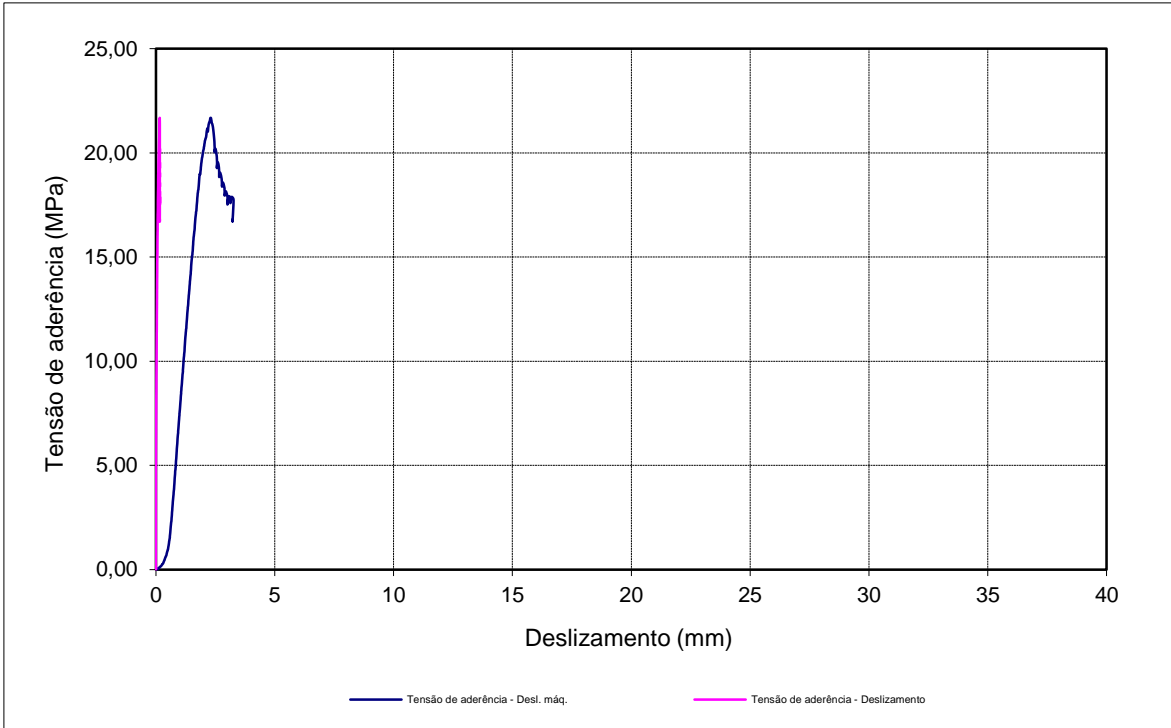
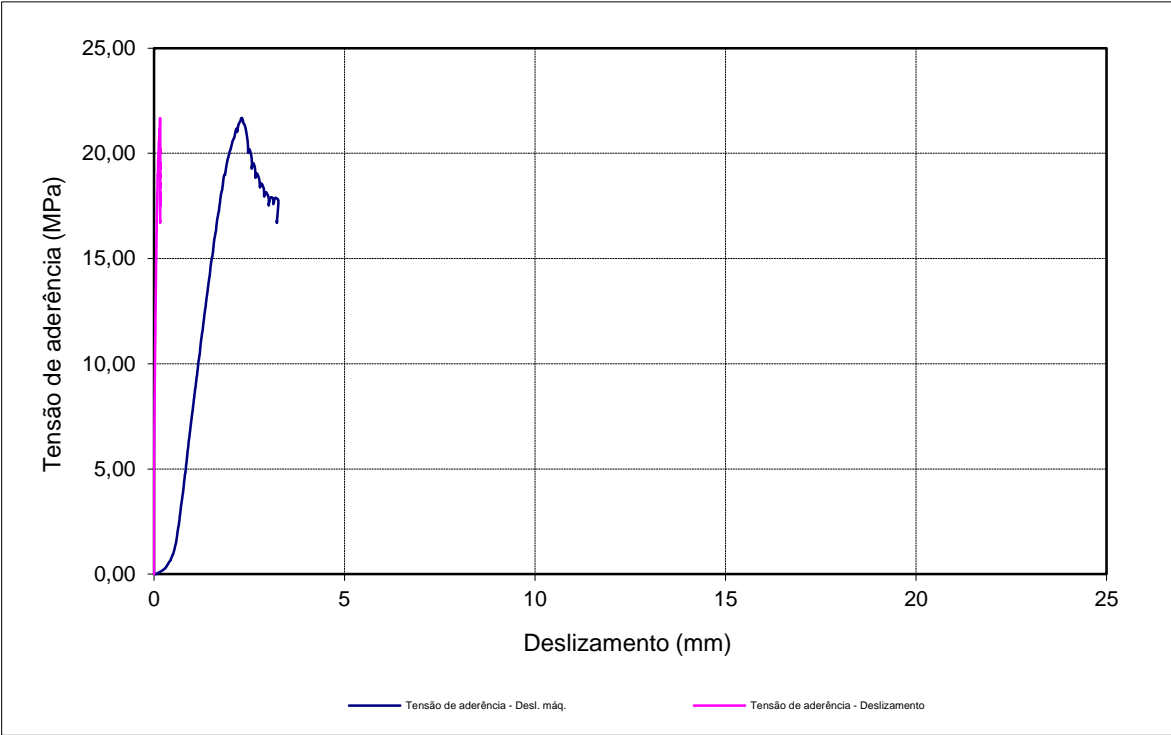
Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	16
fr, média	0,099

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	68
fc [MPa]	69,75

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
7,09	18,98	---	13,03	21,68

\* valores condicionados pela encurvadura do varão

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	3,27
Média dos dois CDP's	0,17



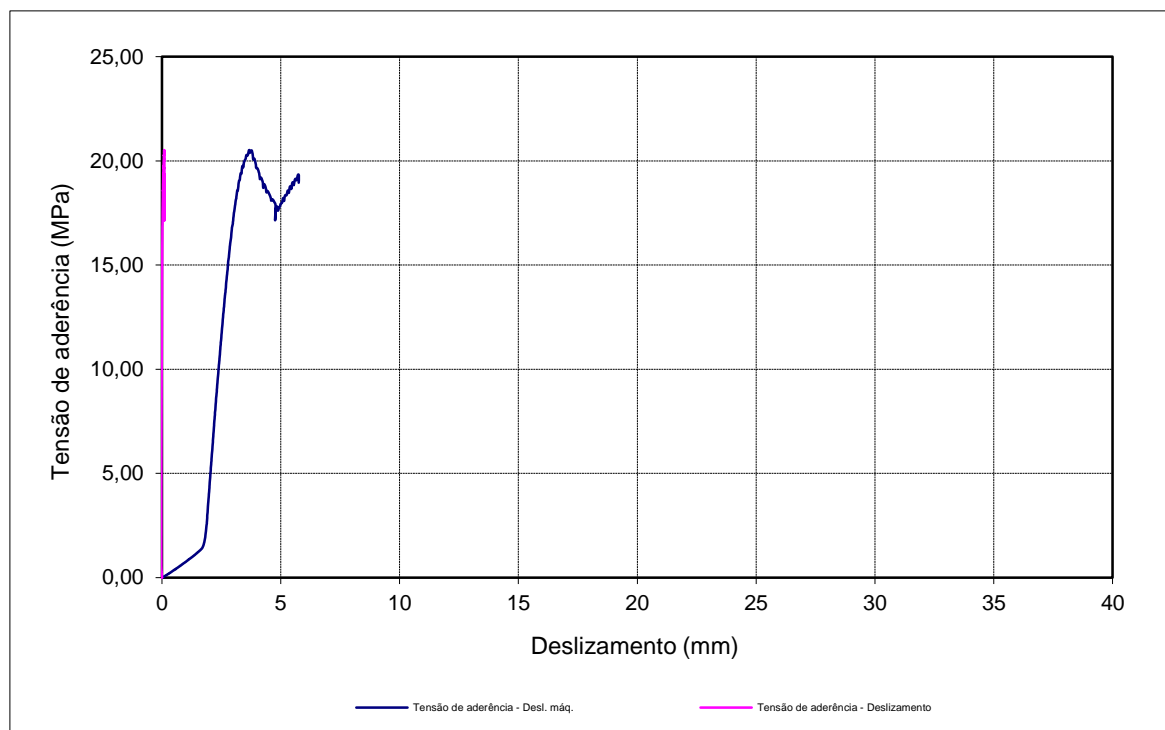
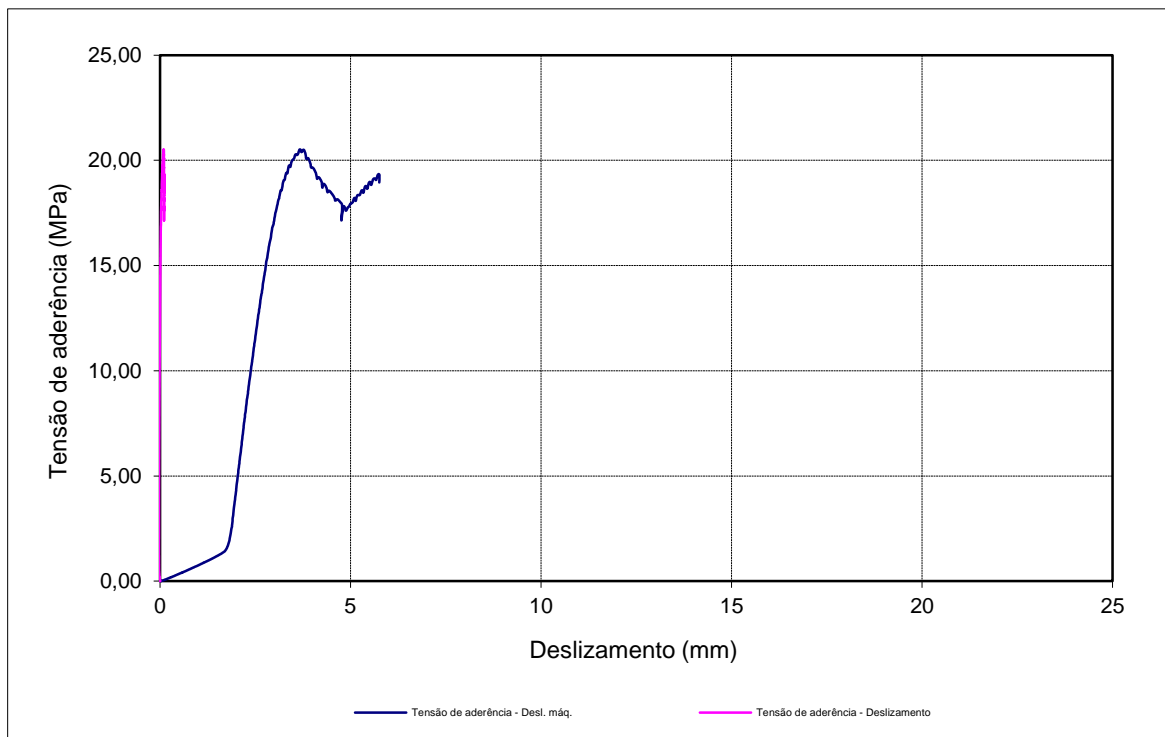
Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	16
fr, média	0,099

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	68
fc [MPa]	69,75

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
14,79	20,49	---	17,64	20,52

\* valores condicionados pela encurvadura do varão

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	5,76
Média dos dois CDP's	0,11



Propriedades do varão	
Aço	A500NR SD
d [mm]	16
fr, média	0,099

Propriedades do betão	
Betão	C50/60
fcm [MPa]	68
fc [MPa]	69,75

Tensões de aderência				
$\tau_{0,01}$ [MPa]	$\tau_{0,1}$ [MPa]	$\tau_{1,0}$ [MPa]	$\tau_{d,média}$ [MPa]	$\tau_{d,max.}$ [MPa]
16,07	---	---	16,07	21,16

\* valores condicionados pela encurvadura do varão

Deslocamentos Máximos	
Cabeçote da Máquina	3,60
Média dos dois CDP's	0,07

